

RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO

CATARINA ISABEL SÁ PEREIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE
CONSTRUÇÃO**

Orientador: Professora Doutora Maria Joana Ávares Ribeiro de Sousa Coutinho

JUNHO DE 2015

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a Mestrado Integrado em Engenharia Civil – 2014/2015 – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

“Só não erra nunca quem nunca faz nada.”
William Connor Magee

AGRADECIMENTOS

Este trabalho só foi possível devido ao apoio e ajuda de inúmeras pessoas, desta forma quero expressar a minha gratidão a todos eles que contribuíram para a realização do mesmo de uma forma direta ou indireta.

À minha orientadora, Professora Maria Joana Álvares Ribeiro de Sousa Coutinho, quero agradecer a oportunidade e a confiança depositadas em mim, pelo apoio, motivação e disponibilidade ao longo de todo o percurso.

À Eng^a Patrícia e a todo o pessoal do Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção, em particular à Cecília, Irene e Dora, que sempre me orientaram e me receberam com toda a simpatia e disponibilidade.

À Eng^a Paula que me prestou auxílio em alguns dos ensaios.

À empresa de Resíduos de Construção e Demolição SA, pelo fornecimento da amostra.

Aos meus pais e amigos que sempre me apoiaram durante todo o meu percurso, acreditaram em mim e sem eles a conclusão desta etapa não seria possível.

RESUMO

O betão é o material de construção mais consumido no mundo, produzindo-se 1 m³ de betão por pessoa anualmente. O fabrico do constituinte fundamental, o cimento, é responsável por cerca de 5% das emissões globais de CO₂.

A indústria cimenteira pode contribuir para uma redução deste gás, através do uso de adições pozolânicas provenientes de resíduos como substitutos parciais do cimento. De outro modo, os resíduos seriam depositados em aterro aumentando o risco de poluição da zona envolvente. A substituição parcial do cimento permite uma poupança de matérias-primas virgens. Hoje em dia, vários resíduos e subprodutos podem ser legalmente utilizados como substitutos parciais do cimento tais como as cinzas volantes.

O presente trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade de utilização de resíduos de construção e demolição como substituto parcial do cimento. Os resíduos de construção e demolição foram moídos até se obter uma finura inferior à do cimento, tendo sido utilizado em pastas e argamassas como substitutos parcial de cimento Portland em 0% (argamassa de controlo), 5% e 10%.

Foi executado um programa experimental com o intuito de avaliar vários parâmetros incluindo a determinação das resistências mecânicas aos 7, 28, 90 e 180 dias, penetração de iões cloreto, carbonatação, absorção de água por capilaridade e resistência à reação álcali-sílica.

As argamassas com substituição parcial apresentaram um melhor desempenho que a argamassa com 100% de cimento em relação à penetração de cloretos e expansão devido à reação álcali-sílica. Relativamente as resistências mecânicas, o desempenho obtido foi um pouco inferior, sobretudo para a maior percentagem de substituição. O parâmetro que obteve um comportamento bastante inferior relativamente à argamassa de controlo foi a absorção de água por capilaridade.

Assim, poder-se-á concluir que este resíduo (em particular) poderá substituir parcialmente o cimento Portland em pequenas percentagens levando a uma perda marginal de resistência mas com aumento de durabilidade exceto no que diz respeito aos fenómenos que envolvam absorção capilar. De qualquer modo, será sempre importante, para se poder generalizar, prosseguir com a investigação abrangendo outras fontes de resíduos de construção e demolição e, também analisar o efeito em betão.

Em suma, este trabalho abre uma perspetiva em termos de sustentabilidade na construção.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição, argamassa, adição, durabilidade.

ABSTRACT

Concrete is the most used construction material on earth corresponding to 1m³ per person, per year. The main ingredient, cement is responsible for about 5% of the global CO₂ emissions.

The cement industry can contribute for a reduction of this gas through the use of waste-derived pozzolanic additions to partially replace Portland cement. Otherwise these waste materials would be landfilled increasing pollution of the surrounding areas. Using partial cement replacement materials leads to sparing natural resources. Nowadays various waste materials and byproducts such as fly ash can legally be used as partial cement replacement materials

The present work aimed at analysing viability of using construction and demolition waste as partial cement replacement material. Construction and Demolition Waste was ground finer than cement, have been used in paste and mortar as 0 (control), 5% and 10% replacement of Portland cement.

An experimental program was carried out to ascertain various parameters including mechanical strength at 7, 28, 90 and 180 days, chloride ion penetration, carbonation, expansion due to ASR-alkali-silica reaction and sorptivity.

Mortar with Construction and Demolition Waste showed better performance than pure Portland cement mortar in terms of chloride ion penetration and alkali-silica reaction. In terms of strength performance was a little lower, reducing further for higher dosage of Construction and Demolition Waste. Performance for absorption of water through capillarity was much reduced for mortar containing Construction and Demolition Waste.

Therefore, in general Construction and Demolition Waste (in particular) may be considered for partial Portland cement replacement in small dosages leading to marginal strength loss and increased durability except for processes absorption by capillarity and carbonation. However, to be able to generalize, research must proceed considering other Construction and Demolition Waste sources and also the effects on concrete.

KEYWORDS: construction and demolition waste, mortar, addition, durability.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICES DAS FIGURAS.....	XI
ÍNDICES DAS TABELAS	XIII
ABREVIATURAS.....	XV

INTRODUÇÃO.....1

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.1.1. GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	1
1.1.2 GESTÃO DE RESÍDUOS (RUSSO, 2003)	2
1.1.3 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	3
1.2. FABRICO DE CIMENTO PORTLAND E EMISSÕES ATMOSFÉRICAS.....	4
1.3 JUSTIFICAÇÃO E OBJETIVO DO PRESENTE TRABALHO	5
1.4. ORGANIZAÇÃO DA TESE	6
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	7

ESTADO DE ARTE.....9

2.1. INTRODUÇÃO	9
2.1.1. ENQUADRAMENTO GERAL DO CDW NO SECTOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL	9
2.2. DEFINIÇÃO E ORIGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	10
2.2.1. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO	10
2.2.2. RESÍDUOS DE DEMOLIÇÃO	12
2.3 COMPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	12
2.4. DESTINO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	15
2.5. DEMOLIÇÃO SELETIVA OU DESCONSTRUÇÃO	17
2.5.1. VANTAGENS DA DEMOLIÇÃO SELETIVA.....	18
2.5.2. IMPEDIMENTOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA DEMOLIÇÃO SELETIVA	19
2.6. LEGISLAÇÃO APLICÁVEL AOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM PORTUGAL.....	20
2.6.1 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO EM PORTUGAL	20
2.6.1.1.DECRETO-LEI Nº178/2006	21

REDUZIR.....	21
REUTILIZAR	21
RECICLAR	21
ELIMINAR/ATERRO	21
2.6.1.2. DECRETO-LEI Nº73/2011	22
2.6.1.3. PORTARIA N.º 335/97	23
2.6.1.4. PORTARIA N.º 417/2008	23
2.6.1.5. PORTARIA Nº 209/2004	23
2.6.1.6. DECRETO-LEI Nº 152/2002	23
2.7. UTILIZAÇÃO DE CDW EM OBRA	23
2.8. RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	24
2.8.1. ENQUADRAMENTO GERAL	24
2.8.2. PROCESSAMENTO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	25
2.8.3. MATERIAIS RESULTANTES DO PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS.....	28
2.8.4. IMPEDIMENTOS PARA O DESENVOLVIMENTO DO PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	29
2.8.5. COMO PROMOVER A UTILIZAÇÃO DA REUTILIZAÇÃO E RECICLAGEM DE CDW.....	30
2.9. IMPACTOS POSITIVOS ASSOCIADOS À GESTÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	31
2.10. ESTUDOS REALIZADOS COM AGREGADOS DE CDW RECICLADOS PARA UTILIZAÇÃO NO BETÃO	31
2.11. POSSÍVEIS DE APLICAÇÕES DOS AGREGADOS PROVENIENTES DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	33
2.11.1. APLICAÇÃO EM ESTRADAS	33
2.11.2. APLICAÇÕES EM EDIFÍCIOS.....	34
2.11.3. APLICAÇÕES EM AGREGADOS PARA BETÃO	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34

PROGRAMA EXPERIMENTAL 39

3.1. INTRODUÇÃO.....	39
3.2. MATERIAIS UTILIZADOS	40
3.2.1. CIMENTO	40
3.2.2. FINOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO MOÍDOS	41
3.2.2.1 ORIGEM DA AMOSTRA.....	41

3.2.2.2. DETERMINAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA	43
3.2.2.3. AFINAÇÃO DA MOAGEM DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	44
3.2.2.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARRIMENTO (MEV) EM PARTÍCULAS DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO MOÍDAS	47
3.2.3. AREIA NORMALIZADA CEN	48
3.2.5. ÁGUA	49
3.2.6 FÍLER CARBONATO DE CÁLCIO.....	49
3.3. ENSAIOS.....	50
3.3.1. COMPOSIÇÃO E FABRICO DOS PROVETES	50
3.3.2. TRABALHABILIDADE	53
3.3.3 MASSA VOLÚMICA	54
3.3.4. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA NORMAL E DO TEMPO DE PRESA	56
3.3.5. EXPANSIBILIDADE.....	58
3.3.6. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS	60
3.3.7. RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO	63
3.3.8. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	66
3.3.9. PENETRAÇÃO DE CLORETOS.....	69
3.3.10. REACÇÃO ÁLCALI-SÍLICA.....	73
3.3.10.1. ASR EM ARGAMASSAS COM CDW	76
3.3.10.2. ASR EM ARGAMASSA COM FÍLER	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS81

4.1 INTRODUÇÃO.....	81
4.2. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE PROPRIEDADES E RESULTADOS	81
4.2.1. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	81
4.2.2. DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA	82
4.2.3. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE VARRIMENTO (MEV) EM PARTÍCULAS DOS CDW MOÍDOS	82
4.2.4. GRANULOMETRIA	82
4.2.5. TRABALHABILIDADE	83
4.2.6. MASSA VOLÚMICA	83
4.2.7. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA E DO TEMPO DE PRESA	84
4.2.8. EXPANSIBILIDADE.....	84

4.2.9. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS E ÍNDICE DE ATIVIDADE	85
4.2.10. RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO	87
4.2.11. PENETRAÇÃO ACELERADA POR CLORETOS	88
4.2.12. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	89
4.2.13. REACÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA (ASR).....	90
4.2.13.1. ASR EM ARGAMASSAS COM CDW	90
4.2.13.2. ASR EM ARGAMASSA COM FÍLER.....	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91

CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS 93

5.1 INTRODUÇÃO	93
5.2. CONCLUSÕES GERAIS.....	93
5.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	95

ÍNDICES DAS FIGURAS

Figura 1. 1 - Hierarquia dos resíduos sólidos (Kurdve <i>et al.</i> , 2014)	3
Figura 1. 2 - Fluxograma de materiais e processos na produção de cimento e betão (Coutinho, 2014) .	4
Figura 1. 3 Esquema das emissões geradas durante o processo de fabrico de cimento (Usón <i>et al.</i> , 2013)	5
Figura 2.1 - Deposição ilegal de CDW (Tessaro, Sá e Scremin, 2012)	15
Figura 2. 2 -Percurso dos CDW com uma gestão eficiente (Department of Design and Construction, 2003)	16
Figura 2. 3 - Percurso dos CDW com uma gestão pouco eficiente (Department of Design and Construction, 2003).....	16
Figura 2. 4 - Percurso dos CDW sem gestão dos mesmos (Department of Design and Construction, 2003)	17
Figura 2. 5 - Processo de demolição seletiva/desconstrução (Gonçalves e Neves, 2003)	18
Figura 2. 6 - Adaptação da hierarquia da gestão de resíduos (Spies, 2009).....	21
Figura 2. 7 - Exemplo de uma central móvel (Gonçalves <i>et al.</i> , 2015).....	25
Figura 2. 8 - Exemplo de uma central fixa (Gonçalves <i>et al.</i> , 2015).....	26
Figura 2. 9 - Esquema de processamento de CDW de uma central fixa (Gonçalves <i>et al.</i> , 2015).....	27
Figura 3. 1 - Curva granulometria do cimento obtida pelo granulómetro laser	41
Figura 3. 2 - Amostra de CDW	41
Figura 3. 3 - Granulometrias obtidas durante o processo de reciclagem dos CDW (RCD).....	42
Figura 3. 4 - Peneiração da amostra de CDW no peneiro 4mm	43
Figura 3. 5 - Esquatelamento da amostra	44
Figura 3. 6- Fases de moagem no moinho de bolas	45
Figura 3. 7 - Curva granulométrica laser do CDWf com 8h,13h,24h e 48h de moagem	45
Figura 3. 8 - Curva granulométrica laser do cimento e do CDWf moído 48h	46
Figura 3. 9 - Massa de CDW rejeitada	47
Figura 3. 10 – Partículas de CDWf moídas, observadas em MEV	47
Figura 3. 11 – Partícula de maior dimensão (Z1) e de menor dimensão (Z2) sinalizadas na imagem recolhida no MEV	48
Figura 3. 12 - Espectro da Zona Z1 (esq.) e Z2 (dir.)	48
Figura 3. 13 - Curva granulométrica laser do fíler de carbonato de cálcio	49
Figura 3. 14 - Compactador.....	51
Figura 3. 15 - Enchimento dos moldes na mesa vibratória	51
Figura 3. 16 - Compactação manual dos provetes de ASR	52
Figura 3. 17 - Argamassa no molde tronco-cónico (esq.) e espalhamento da argamassa após sofrer 25 pancadas (dir.).....	53
Figura 3. 18 - Fases do ensaio de determinação de massa volúmica	55
Figura 3. 19 - Início do ensaio para a determinação da consistência normal	56
Figura 3. 20 - Penetração da sonda na pasta.....	57
Figura 3. 21 - Proвете de pasta durante (esq.) e após o ensaio (dir.) para a determinação do tempo de presa	58
Figura 3. 22- Moldes colocados num banho de água antes da medição (A)	59
Figura 3. 23 - Moldes colocados em água em ebulição antes da medição (B).....	59
Figura 3. 24 - Arrefecimento dos moldes, ocorrendo posteriormente a medição C.....	59

Figura 3. 25 - Provete após enchimento (esq.) e desmoldagem (dir.).....	61
Figura 3. 26 - Início (esq.) e fim do ensaio de determinação de resistência à flexão	61
Figura 3. 27 - Início (esq.) e fim (central) do ensaio de à compressão e efeito de cintagem (dir.)	62
Figura 3. 28 – Resultados médios da resistência à flexão aos 7d, 28d e 90d	62
Figura 3. 29 – Resultados médios da resistência à compressão aos 7d, 28d e 90d	63
Figura 3. 30 - Provete na câmara de fluência.....	64
Figura 3. 31 - Corte dos provetes	64
Figura 3. 32 - Resultado da reação entre a argamassa e fenolftaleína	65
Figura 3. 33 - Esquema das profundidades de carbonatação para cada espécime	66
Figura 3. 34 - Esquema do ensaio de capilaridade	67
Figura 3. 35 - Retas de absorção relação ao tempo durante as primeiras 4h30m	68
Figura 3. 36 - Provete na camara de vácuo	70
Figura 3. 37 - Provete sujeito a um potencial elétrico	70
Figura 3. 38 - Esquema das medições realizadas na face do provete	71
Figura 3. 39 - Provete após a aplicação do nitrato de prata	71
Figura 3. 40 - Representação gráfica do coeficiente de difusão médio	73
Figura 3. 41 - Provete moldado (esq.) e numeração das faces dos provetes (dir.)	74
Figura 3. 42 - Provete submersos em água	75
Figura 3. 43 - Exemplo de uma medição.....	76
Figura 3. 44 – Representação gráfica das expansões dos provetes com CDWf em comparação com o provete de CTL.....	77
Figura 3. 45 - Resultados das expansões dos provetes com fíler.....	78
Figura 3. 46 - Representação gráfica das expansões dos provetes com fíler em comparação com o provete de CTL.....	78
 Figura 5. 1 - Comparação geral de resultados de CDWf	 95

ÍNDICES DAS TABELAS

Tabela 2. 1 - Causas dos resíduos de construção (Silva, 2008).....	11
Tabela 2. 2 – Composição dos CDW para alguns países da Europa (European Commission, 2011)...	14
Tabela 2. 3 - Composição dos CDW em diferentes regiões de Portugal (Coelho e Brito, 2012) (Pereira, Aguiar e Jalali, [s.d.]).....	15
Tabela 2. 4 - Potencial para reaproveitamento de resíduos (Silva, 2008)	29
Tabela 3. 1 - Dimensões do cimento e do CDW com 13h, 24h e 48h de moagem.....	46
Tabela 3. 2 - Composição granulométrica da areia referência retirada da NP EN 196-1.....	49
Tabela 3. 3 - Comparação das dimensões entre o material moído 48h e o fíler.....	50
Tabela 3. 4 - Quantidades para cada argamassa.....	50
Tabela 3. 5 - Composição das pastas.....	52
Tabela 3. 6 - Valores da trabalhabilidade (em mm) recolhidos em todos os ensaios com utilização da argamassa	54
Tabela 3. 7 – Resultados obtidos no ensaio de determinação de massa volúmica	56
Tabela 3. 8 - Resultados obtidos nos ensaios de determinação da Consistência normal e do Tempo de presa	58
Tabela 3. 9 - Resultados obtidos no ensaio da Expansibilidade (em mm).....	60
Tabela 3. 10 - Resultados do ensaio de carbonatação	65
Tabela 3. 11 - Resultados dos coeficientes de absorção de água por capilaridade.....	69
Tabela 3. 12 - Resultados do coeficiente de difusão no estado não estacionário	72
Tabela 3. 13 – Valor médio da expansão para as argamassas com CDWf.....	76
Tabela 4. 1 – Dimensões características das amostras de cimento e CDWF	82
Tabela 4. 2 – Resultados obtidos para a trabalhabilidade	83
Tabela 4. 3 - Resultados e valores exigidos para a massa volúmica dos materiais utilizados	83
Tabela 4. 4 - Resultados obtidos nos ensaios de determinação da Consistência normal e do Tempo de presa	84
Tabela 4. 5 - Valores e desempenho do ensaio para a determinação da expansibilidade	84
Tabela 4. 6 - Requisitos Mecânicos expressos como valores característicos especificados (NORMA)	85
Tabela 4. 7 - Classes de Pozolanicidade e respetivas composições da argamassa	85
Tabela 4. 8 - Valores e desempenho da resistência à flexão	85
Tabela 4. 9 - Valores e desempenho da resistência à compressão	86
Tabela 4. 10 – Resultados desempenho do das resistências mecânicas à flexão obtidos por Ghrici et al.	87
Tabela 4. 11 – Resultados do desempenho das resistências mecânicas à compressão obtidos por Ghrici et al.	87
Tabela 4. 12 - Resultados e desempenho do ensaio da resistência à carbonatação	88
Tabela 4. 13 - Relação entre a classe de resistência do betão e o coeficiente de difusão (Instituto Português da Qualidade, 1993)	88
Tabela 4. 14 - Resultados do Dns obtidos no ensaio	89
Tabela 4. 15 - Limites do coeficiente de absorção (Bertolini <i>et al.</i> , 2004; Browne, 1991)	90
Tabela 4. 17 - Expansões médias aos 14 dias e 26 dias e o respetivo desempenho	90
Tabela 4. 18 - Expansões médias aos 14 dias e 26 dias e o respetivo desempenho do fíler	91
Tabela 5. 1 - Resultados da maioria dos ensaios realizados neste trab alho	94

ABREVIATURAS

μm - micrómetro

C_3A - Aluminato tricálcico

C_4AF - Ferroaluminato tetracálcico

C_2S – Silicato bicálcico

C_3S – Silicato tricálcico

Ca – Cálcio

CaO – Óxido de cálcio

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ – Hidróxido de cálcio

CaCO_3 - Carbonato de cálcio

CDW - resíduos de construção e demolição

CDWf – resíduos de construção e demolição moídos 48h

CDWf5 - Argamassa com substituição de 5% de cimento por CDWf

CDWf10 - Argamassa com substituição de 10% de cimento por CDWf

CO_2 - Dióxido de carbono

CSH – Gel de Silicato de Cálcio Hidratado

EU – União Europeia

LEMC – Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MEV – Microscópio Eletrónico de Varrimento

MPa – Mega Pascal

NaOH - Hidróxido de sódio

NA – Agregados Naturais

RA – Agregados reciclados

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1.1. GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Desde o início da humanidade que se produzem resíduos sendo que até meados do século XX as quantidades eram moderadas e a própria natureza era capaz de os reabsorver, não causando problemas ambientais. Porém, o desenvolvimento tecnológico e aumento da população provocou um consumo de matérias-primas cada vez maior, e como consequência, o volume de resíduos gerados aumentou drasticamente, levando os responsáveis de cada país a criarem legislação específica. Em 1972, realizou-se em Estocolmo uma conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente, um marco importante no sentido de preservar e melhorar o meio ambiente. Porém, foi apenas em 1987 que a comissão Mundial sobre o meio ambiente e desenvolvimento incorporou o conceito de 'Desenvolvimento Sustentável'. Originalmente este conceito procurava conciliar o desenvolvimento económico com a preservação ambiental, assim como, o fim da pobreza no mundo (Chahud, 2007).

Nos dias de hoje, os resíduos sólidos urbanos integram um dos maiores problemas ambientais presentes nas grandes cidades do século XXI. O crescimento exponencial da quantidade de resíduos gerados, a par de uma maior diversidade do tipo de resíduos e a menor capacidade de se degradarem na natureza, são aspetos que separam o estilo de vida do início e meados do século XX (Portal do ambiente e do cidadão).

Segundo a legislação atualmente em vigor em Portugal, resíduo é qualquer substância ou objeto de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer, nomeadamente identificados na Lista Europeia de Resíduos. Estes podem ser: resíduos agrícolas (provenientes da exploração agrícola e/ou similar), resíduo de construção e demolição, resíduo hospitalar (proveniente de atividades médicas relacionada com seres humanos ou animais), resíduo industrial (gerado por processos industriais, resíduo inerte (este não sofre transformações físicas, químicas ou biológicas importantes), resíduo perigoso e resíduo urbano (proveniente de habitações, bem como outro resíduo que, pela sua natureza ou composição, seja semelhante ao resíduo proveniente de habitações) (Ministério Do Ambiente, 2008).

A grande maioria dos resíduos tem como destino final a deposição em aterro, que para além de tornar inviável a futura utilização do espaço, pode provocar a poluição do solo, ar e água na zona envolvente do aterro. A poluição do ar nos aterros pode ser causada pela libertação de dióxido de carbono e metano para a atmosfera e a contaminação do solo e de águas subterrâneas devido à presença de produtos químicos e pesticidas.

A gestão de resíduos é conhecida por ser um dos principais problemas nos países em desenvolvimento, em particular nos centros urbanos (Matter *et al.*, 2015). O maior desafio da gestão de resíduos é o aumento *per capita* da quantidade de resíduos por habitante e a falta de espaço disponível para a deposição de resíduos. Por exemplo, apenas 40% dos resíduos sólidos urbanos da União Europeia são reciclados, 25% incinerados com recuperação de energia e o restante é colocado em aterros sanitários.

A União Europeia (EU) importa seis vezes mais materiais e recursos naturais do que exporta, consumindo 50% de recursos renováveis mais rapidamente do que são regenerados, o que implica uma pressão insustentável sobre o meio ambiente. Hoje, a quantidade média de resíduos por cidadão da EU é de 500kg por segundo. Estes resíduos acabam nos mares e a maior parte são plásticos. Esta questão não é só um desafio ambiental mas sobretudo um desperdício económico, pois estes resíduos podem ser reutilizados, reciclados ou usados como fonte de energia, reduzindo as emissões de CO₂. (lixo é dinheiro.) (Timmermans *et al.*, 2015). É importante que a EU, mude o rumo e adquira novas estratégias que permitam um desenvolvimento sustentável.

De salientar, que a comissão Europeia irá apresentar um plano ambicioso antes do final deste ano, designado por ‘Economia Circular’, que pretende encontrar o equilíbrio certo entre a legislação, instrumentos e medidas específicas relativas à gestão eficaz de resíduos. Com metas ambiciosas para a reciclagem e gestão de resíduos, este projeto irá canalizar fundos de investimento, promover a investigação e inovação, assim como, oferecer incentivos. A comissão acredita que este plano é uma oportunidade para reinventar a economia e criar novas vantagens competitivas para a Europa e a indústria e irá exigir esforços e mudanças, a nível dos produtores, distribuidores, comerciantes e consumidores (Timmermans *et al.*, 2015).

1.1.2 GESTÃO DE RESÍDUOS (RUSSO, 2003)

Nos dias de hoje, existe uma produção de resíduos sólidos desmesurados e em grandes volumes. ‘*Na última década houve uma duplicação da produção de resíduos por habitante, em termos de peso, e quase o quádruplo em termos de volume*’.

A crescente industrialização e urbanização das sociedades modernas têm provocado uma produção exponencial de resíduos sólidos, problema que exige o desenvolvimento de soluções técnicas para minimizá-los. De salientar, que a problemática relativa aos resíduos é recente, visto que antigamente a quantidade era reduzida e basicamente orgânica, permitindo que os desperdícios fossem reciclados localmente, a nível doméstico.

A gestão dos resíduos sólidos em Portugal começa a chamar a atenção dos responsáveis políticos. É caso para dizer que, os resíduos sólidos estão finalmente a receber a atenção merecida. Portugal deve seguir uma estratégia cujos princípios são os da adoção de sistemas integrados (ver Figura 1.1):

- Redução e Reutilização de resíduos;
- Reciclagem;
- Compostagem;
- Incineração energética;
- Aterro energético;
- Programas de Educação Ambiental e de Participação Comunitária.



Figura 1. 1 - Hierarquia dos resíduos sólidos (Kurdve *et al.*, 2014)

1.1.3 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A indústria da construção, entre outros fatores, é um dos pilares do desenvolvimento económico e social de um país. Contudo é uma atividade pouco sustentável a nível ambiental, produzindo uma elevada percentagem de resíduos e consumindo cerca de 40% dos recursos naturais extraídos (Santos *et al.*, 2004).

O conceito de ‘construção sustentável’ surgiu como tentativa de minimizar os efeitos negativos que o sector de construção tem sobre o ambiente, ou seja, o desenvolvimento do património edificado não pode pôr em causa a qualidade de vida das gerações vindouras. Isto implica que a construção seja mais eficiente e proveitosa com responsabilização nos campos dos resíduos, qualidade de vida, poluição, e satisfação dos utilizadores. Considera-se um edifício sustentável se (Brito, 2004):

- Existir uma utilização eficiente de materiais amigos do ambiente, com pouca energia incorporada e renováveis;
- For gerada uma quantidade mínima possível de resíduos e poluição no decurso do ciclo de vida;
- Forem empregues materiais reutilizáveis ou recicláveis no próprio local, evitando a utilização de compósitos, raramente reaplicáveis;
- Forem cumpridas as necessidades dos utilizadores no presente e no futuro.

Uma das soluções para a diminuição destes resíduos é construir edificações mais duráveis, diminuindo-se desta forma possíveis intervenções de substituição parcial ou total dos elementos da construção (Brito, 2004).

A reciclagem e a reutilização dos resíduos de construção e demolição são uma opção cada vez mais viável para reduzir a quantidade de resíduos a colocar em aterro, tendo como principal vantagem a obtenção de matéria-prima capaz de substituir a utilização de matéria-prima virgem (Brito e Gomes, 2001). Porém a confiança nos subprodutos da indústria de demolição ainda é muito baixa, devido à mais baixa qualidade dos mesmos, comparando com os matérias de origem natural.

A consciência ambiental de prevenir e limitar a produção de resíduos gerou a necessidade de descobrir possibilidades de reutilização dos resíduos produzidos, um dos grandes desafios no próprio sector da construção atualmente. Como é natural estas preocupações não ser podem separadas dos aspetos

económicos, devendo-se encontrar um equilíbrio entre os custos de triagem e valorização dos resíduos, o valor do material reciclado, a quantidade de resíduos de construção e demolição produzidos e o custo da matéria-prima natural (Sousa, Faria e Sousa, 2001).

1.2. FABRICO DE CIMENTO PORTLAND E EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

O cimento Portland (ligante hidráulico) usado para a produção de betão, é um ligante cuja produção consome grandes quantidades de energia e também é responsável por grande parte das emissões de dióxido de carbono (CO_2) e gases de efeito estufa (Mehta, 2002).

O betão é o material de construção mais utilizado no mundo, a seguir à água é o segundo produto mais consumido no planeta. Cada ano a indústria de betão usa 1,6 bilhões de toneladas de cimento, 10 bilhões de toneladas de rocha e areia, e 1 bilhão de toneladas de água. Normalmente, um betão comum contém cerca de 12% de cimento, 8% de água e 80% de agregado (Mehta, 2002).

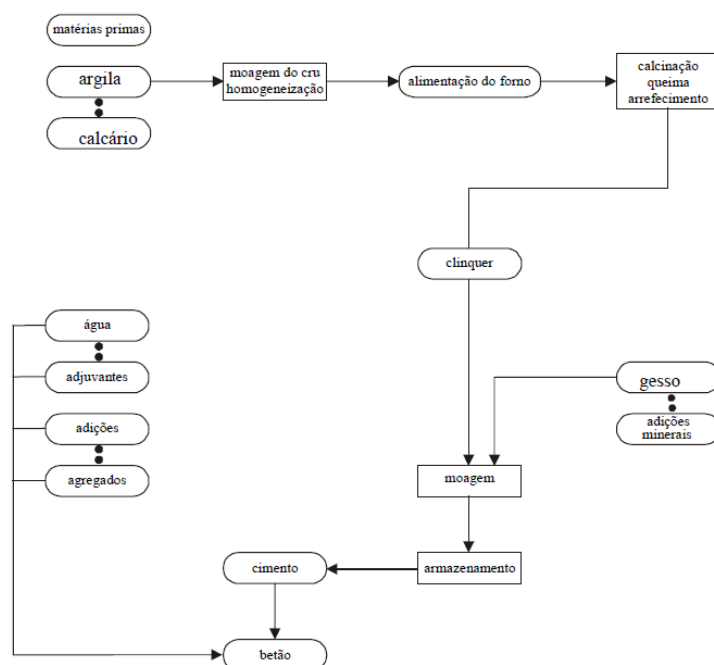


Figura 1. 2 - Fluxograma de materiais e processos na produção de cimento e betão (Coutinho, 2014)

O processo de fabrico de cimento é realizado através da exploração das matérias-primas existentes na pedreira, as quais devem conter, em determinadas proporções, Cálcio, Sílica, Alumina e Ferro (Secil, [s.d.]).

Após a recolha das matérias-primas, estas são secas e moídas até à obtenção de um pó muito fino (cru ou farinha), que é depois armazenado e homogeneizado. Um tratamento térmico apropriado transforma a farinha em clínquer, este é um produto intermédio, no qual já é possível encontrar os constituintes mineralógicos do cimento. Para tal, a farinha entra num permutador de calor em contracorrente com os gases quentes oriundos do forno, iniciando-se o processo de descarbonatação. Com a utilização de um forno cilíndrico rotativo (tubo ligeiramente inclinado para facilitar o deslizamento da farinha no seu interior), a temperatura no seu interior atinge valores superiores a 1500° C, conduzindo à cozedura da farinha, que dá origem ao clínquer (Cimpor, 2015).

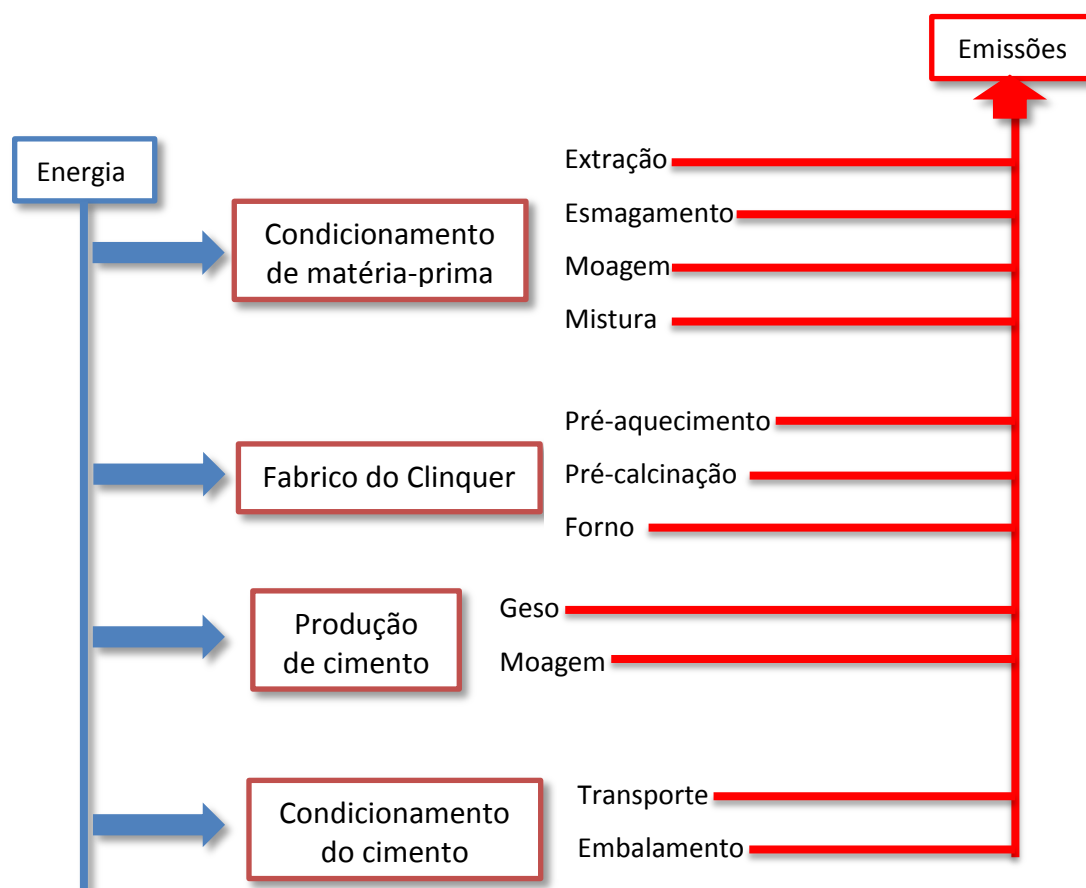


Figura 1. 3 Esquema das emissões geradas durante o processo de fabrico de cimento (Usón *et al.*, 2013)

Atualmente os dados publicados em alguns estudos revelam que o subsector relacionado com a produção de cimento é responsável por cerca de 10% a 15% do consumo de energia a nível mundial, atingindo um consumo de 120 kWh/t de cimento. Além disso, as fábricas são tradicionalmente caracterizadas por serem consumidores intensivos de matérias-primas naturais, de combustíveis fósseis, e por serem emissoras de poluentes.

Em 2005, a indústria do cimento, gerou cerca de 6% de CO₂ do total das emissões globais de CO₂. Nos últimos anos, este valor foi reduzido até 5% a nível mundial, sendo que na Europa o valor baixou para 4,1%. Esta redução foi provocada por melhoramentos a nível da eficiência energética, os combustíveis alternativos e os materiais.

1.3 JUSTIFICAÇÃO E OBJETIVO DO PRESENTE TRABALHO

Os resíduos, em particular os resíduos de construção e demolição, são um problema em termos ambientais e há que procurar reciclar de forma a reduzir a deposição em aterro. Por outro lado, a produção de cimento Portland está associada a grandes consumos de matérias-primas e energia e, à produção de grandes quantidades de emissões de gases com efeito de estufa, sobretudo CO₂. Sendo que o presente trabalho destinou-se a investigar a possibilidade de substituir parcialmente o cimento Portland por resíduos de construção e demolição previamente preparados, incluindo moagem. Na realidade vários outros resíduos tratados têm sido estudados como substitutos parciais do cimento

tendo-se obtido resultados de sucesso como por exemplo, o vidro (Matos e Sousa-Coutinho, 2012), lamas de granito (Ramos *et al.*, 2013).

É de salientar, que um resultado positivo deste estudo, isto é, a viabilidade de utilização de resíduos de construção em substituição parcial do cimento Portland implicará um processo complexo de preparação e homogeneização dos vários tipos de resíduos de construção e demolição que podem ter características tão diferentes resultantes da sua origem e processos que sofreram. No entanto um procedimento industrial semelhante já é realizado na fase de pré homogeneização e homogeneização na preparação do cru para fabrico do clínquer.

Em termos experimentais, foi necessário preparar mecanicamente a amostra recolhida de forma a obter uma finura semelhante ao cimento e depois analisou-se a massa volúmica, a granulometria e a quantidade de matéria orgânica da amostra.

Também foram realizados ensaios em pasta onde o cimento foi substituído por resíduos de construção e demolição moídos em 5 e 10% em massa e que permitiram estudar a expansibilidade, tempos de presa e consistência.

Finalmente foram produzidas argamassas em que o cimento Portland foi substituído por resíduos de construção e demolição e foram analisadas várias propriedades, tais como:

- Resistências mecânicas à flexão e compressão;
- Resistência à carbonatação;
- Trabalhabilidade;
- Penetração de cloretos;
- Absorção de água por capilaridade;
- Expansão provocada pela reação álcali-sílica.

1.4. ORGANIZAÇÃO DA TESE

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos.

- Capítulo 1 – Introdução: destina-se à contextualização do tema;
- Capítulo 2 – Estado da Arte: apresentam-se as bases de conhecimento sobre o material em estudo (os resíduos de construção e demolição) relacionadas com a origem, composição, destinos, aplicações e estudos.
- Capítulo 3 – Programa Experimental: caracterizam-se os materiais utilizados, apresentaram-se as metodologias relativas a cada ensaio praticado nas diferentes argamassas em estudo, assim como os resultados obtidos;
- Capítulo 4 – Análise e Discussão de resultados: avaliou-se o desempenho dos resíduos de construção e demolição testado a partir dos resultados obtidos nos ensaios, assim como a sua interpretação e comparação com os resultados face ao material de controlo;
- Capítulo 5 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros: Referem-se as conclusões e sugestões para futuros desenvolvimentos sobre o tema em estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRITO, Jorge - DESCONSTRUÇÃO - UMA VISÃO POSSÍVEL DO FUTURO DA CONSTRUÇÃO. Em **REPENSAR A CONSTRUÇÃO VOL.1**

BRITO, Jorge; GOMES, Raul - Reciclagem e reutilização de subprodutos da demolição pelo uso controlado de explosivos. Em **Construção 2001 - Congresso Nacional de Construção**. p. 871–878.

CHAHUD, Eduardo - **Reciclagem de resíduos para a construção civil**

CIMPOR - **Produção cimento** [Em linha], atual. 2015. Disponível em WWW:<URL:http://www.cimpor.pt/artigo.aspx?lang=pt&id_object=29&name=Producao--cimento>.

COUTINHO, Joana De Sousa - Materiais de construção 2 - ligantes Atualização 2014. 2014).

KURDVE, Martin *et al.* - Waste flow mapping to improve sustainability of waste management: a case study approach. **Journal of Cleaner Production**. . ISSN 09596526. 98:2014) 304–315. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.06.076.

MATOS, Ana Mafalda; SOUSA-COUTINHO, Joana - Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. **Construction and Building Materials**. . ISSN 09500618. 36:2012) 205–215. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027.

MATTER, Anne *et al.* - Impacts of policy and market incentives for solid waste recycling in Dhaka , Bangladesh. **Waste Management**. . ISSN 0956-053X. 39:2015) 321–328. doi: 10.1016/j.wasman.2015.01.032.

MEHTA, P. K. - Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development. **Concrete International**. 24:7 (2002) 23–28.

MINISTÉRIO DO AMBIENTE, Do Ordenamento Do Território E. Do Desenvolvimento Regional - Decreto-Lei n.º 46/2008 de 12 de Março. 2008).

PORTAL DO AMBIENTE E DO CIDADÃO - **RESÍDUOS** [Em linha] [Consult. 11 jun. 2015]. Disponível em WWW:<URL:http://ambiente.maiadigital.pt/ambiente/residuos>.

RAMOS, Telma *et al.* - Granitic quarry sludge waste in mortar: Effect on strength and durability. **Construction and Building Materials**. . ISSN 09500618. 47:2013) 1001–1009. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.098.

RUSSO, MÁRIO AUGUSTO TAVARES - TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS. **Universidade de Coimbra**. 1:1 (2003) 1–196.

SANTOS, José *et al.* - Betão com agregados grossos reciclados de betão: resistência à compressão e modulo de elasticidade. Em **REPENSAR A CONSTRUÇÃO VOL.1**. p. 357–362.

SECIL - **Processo de fabrico de cimento** [Em linha] Disponível em WWW:<URL:http://www.secil.pt/default.asp?pag=proc_fabrico>.

SOUSA, Hipolito De; FARIA, José Amorim; SOUSA, Rui Miguel - Demolição de obras e sustentabilidade da construção. Alguns casos de estudo. Em **REPENSAR A CONSTRUÇÃO VOL.1**

TIMMERMANS, Frans *et al.* - **Closing the circle and opening conversation on circular economy** [Em linha], atual. 2015. [Consult. 11 jun. 2015]. Disponível em WWW:<URL:http://ec.europa.eu/commission/2014-2019/vella/announcements/closing-circle-and-opening-conversation-circular-economy-frans-timmermans-jyrki-katainen-elzbieta_en>.

USÓN, Alfonso Aranda *et al.* - Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. . ISSN 13640321. 23:2013) 242–260. doi: 10.1016/j.rser.2013.02.024.

2

ESTADO DE ARTE

2.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo tem como objetivo principal explicar a importância dos CDW nos dias de hoje, demonstrando que se trata de um tema atual, visando o estudo aprofundado da temática de CDW e apresentando o estado de arte do conhecimento sobre estes materiais.

2.1.1. ENQUADRAMENTO GERAL DO CDW NO SECTOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL

A revolução industrial, em meados do século XVIII, permitiu a produção em massa de diversos produtos. Essa época também possibilitou a descoberta de novos materiais e o desenvolvimento desmesurado de vários sectores entre eles, o sector da construção.

Durante este período foram desenvolvidas novas técnicas de construção e ocorreram simultaneamente algumas mudanças no sector.

Após a revolução industrial, o crescimento de diversas indústrias proporcionou um aumento da população, que se traduziu numa carência de edificações. Para responder às necessidades dessa época, construíram-se novas habitações, o que provocou um consumo de matérias-primas nunca antes visto. Com contínuo crescimento da população, a evolução tecnológica e o desenvolvimento de novas técnicas, o desperdício de materiais, designado por resíduos de construção, tornou-se bastante notório.

Contudo, pode-se afirmar que os resíduos de construção e demolição existem desde as primeiras construções mas a sua composição e quantidade variam de acordo com as técnicas construtivas e do período histórico.

Atualmente, a maioria dos CDW advém da demolição, manutenção e construção de edificações, obras marítimas e pontes. Segundo o Decreto-Lei nº46/2008, estima-se que haja uma produção anual de 100 milhões de toneladas na União Europeia.

O volume de CDW gerado em pleno século XXI começou a despertar a atenção de diversos sectores, principalmente do sector ambiental. Estima-se que cerca de um terço dos resíduos colocados em aterro são CDW, sendo que uma parte deste tipo de resíduos são abandonados em aterros ilegais, podendo contaminar os ecossistemas envolventes. Esta preocupação crescente e a interação entre diferentes intervenientes facultaram o desenvolvimento de inúmeras medidas, tais como, gestão dos CDW, centrais de reciclagem específicas para o tratamento destes materiais, criação de legislação específica

para este tipo de resíduos e desenvolvimento de vários estudos para conduzir a futuras aplicações do material resultante do processamento.

Em suma, a quantidade produzida de resíduos não pode continuar a ser ignorada, visto que os efeitos negativos no meio ambiente são incalculáveis. Como tal, este material deve ser alvo de vários estudos científicos na vertente de gestão, de processamento e de uma posterior reutilização (Brito, 2004).

2.2. DEFINIÇÃO E ORIGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

O Decreto-Lei n.º 178/2006 define que “resíduo” é qualquer substância ou objeto de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer.

O sector da construção civil é responsável pela produção de uma parte significativa dos resíduos em Portugal, situação comum aos restantes Estados membro da União Europeia (Ministério Do Ambiente, Do Ordenamento Do Território E Do Desenvolvimento Regional, 2008). Segundo a legislação portuguesa, os CDW são provenientes de obras de construção, reconstrução, ampliação, alteração, conservação e demolição e da derrocada de edificações. Sendo a sua composição bastante heterogénea com frações de dimensões variadas e diferentes níveis de perigosidade que dificultam a sua gestão (Ministério Do Ambiente, Do Ordenamento Do Território E Do Desenvolvimento Regional, 2006).

Nos Estados Unidos, CDW são definidos como os resíduos que são produzidos no processo de construção, manutenção ou demolição de estruturas. As estruturas incluem edifícios de todas as tipologias (residencial e não residencial), estradas e pontes (Zhao, Leefink e Rotter, 2010).

Os resíduos de construção e demolição têm origem em três fases do ciclo de vida das edificações (Llatts, 2013):

1. Projeto de construção, onde as dimensões, materiais de construção e procedimentos necessários para construção são especificados;
2. Execução, quando os materiais são fornecidos e o projeto é realizado de acordo com a proposta;
3. Demolição parcial ou total, quando o edifício ou parte atinge o fim do seu ciclo de vida e os elementos dos edifícios são demolidos (inclui portanto os resíduos de obras de manutenção)

2.2.1. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO

Resíduos de construção são gerados como resultado do trabalho executado em edificações, desde as fundações, estradas, ferrovias, canais, barragens, portos e aeroportos, etc. A sua composição depende do tipo de trabalho de construção e as técnicas utilizadas. Os resíduos resultantes dividem-se essencialmente nas principais categorias (Llatts, 2013):

1. Solo (areia, argila, pedras, lama, etc.) gerados a partir das escavações antes da construção. Estes resíduos podem vir misturados com elementos orgânicos e vegetais.
2. Embalagens de resíduos de materiais de construção como, paletes de madeira, plástico, papelão, entre outros;
3. Restos de materiais de construção tais como, betão, cerâmica, agregados, ferro, alumínio, entre outros.

4. Resíduos perigosos como, solo contaminado, material que pode incluir algumas características perigosas (por exemplo, betão contaminado), materiais à base de amianto, etc..
5. Outros (isto é, materiais orgânicos).

Tabela 2. 1 - Causas dos resíduos de construção (Silva, 2008)

Fase de projeto
<p>Falta de atenção na coordenação dimensional dos produtos;</p> <p>Alterações realizadas no projeto durante o decorrer dos trabalhos;</p> <p>Inexperiência do arquiteto na sequência e método da construção;</p> <p>Falta de atenção aos tamanhos padrão existentes no mercado;</p> <p>Falta de conhecimento do arquiteto quanto a produtos alternativos;</p> <p>Complexidade de detalhes nos desenhos;</p> <p>Falta de informação nos desenhos;</p> <p>Caderno de encargos com erros e incompleto;</p> <p>Seleção de produtos de baixa qualidade.</p>
Fase de execução
<p>Erros cometidos durante o transporte ou pelos operários;</p> <p>Acidentes devido a negligência;</p> <p>Danos no trabalho concluído causados por operações posteriores;</p> <p>Uso incorreto do material que, por sua vez, exige substituição;</p> <p>Aquisição de quantidades inexatas devido à falta de planeamento;</p> <p>Atrasos na entrega de informação ao construtor relacionado com o tamanho e tipo dos produtos a serem utilizados;</p> <p>Mau funcionamento dos equipamentos;</p> <p>Condições climáticas adversas.</p>
Manuseio de materiais
<p>Danos durante o transporte;</p> <p>Armazenamento inadequado que leva à deterioração ou dano dos materiais;</p> <p>Materiais fornecidos em embalagens separadas (por exemplo, sacos de cimento);</p> <p>Utilização do material existente nas proximidades do local de trabalho, mesmo que não seja o mais indicado;</p> <p>Conflitos entre a equipa de projeto e os trabalhadores;</p> <p>Roubo/vandalismo.</p>
Aspetos contratuais

Erros de encomenda (por exemplo, encomendar materiais a mais ou a menos);
Falta de possibilidade de encomendar menores quantidades;
Adquirir produtos que não cumprem as especificações.

2.2.2. RESÍDUOS DE DEMOLIÇÃO

Resíduos de demolição são um produto de desmantelamento da fase de demolição, de restauração e de reparação de edifícios e instalações. São geralmente de natureza pétreo e mais homogêneos do que os resíduos de construção, devido à ausência de grandes quantidades solo e de resíduos de embalagens como se verifica nos resíduos de construção. A sua composição depende das técnicas de construção e os materiais utilizados na construção demolida. Dividindo-se nas seguintes categorias (Llatas, 2013):

1. Materiais não pétreos, como aço, ferro, alumínio, cobre, vidro, madeira, plástico, etc.;
2. Materiais pétreos (resíduos de betão, argamassa, cerâmica, agregados);
3. Resíduos perigosos (materiais contendo amianto, chumbo, zinco, tintas, vernizes, baterias, tubos fluorescentes, lubrificantes, óleos, gorduras, instalações de ar condicionado, etc);
4. Outros (isto é, materiais orgânicos).

Há uma maior probabilidade de resíduos perigosos em obras de demolição do que em construção sobretudo devido à ausência de regulamentos restritivos sobre o uso de materiais perigosos, tais como, amianto e chumbo.

2.3 COMPOSIÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

O termo CDW aplica-se para denominar um conjunto de materiais, entre os quais se destacam (Silva, 2008):

- Resíduos provenientes da demolição total ou parcial de edifícios e/ou de infraestruturas de engenharia civil;
- Resíduos provenientes da construção de edifícios e/ou de infraestruturas de engenharia civil;
- Solo, rochas e vegetação resultantes do nivelamento de terrenos, trabalhos de construção civil e/ou trabalhos gerais de fundações;
- Nivelamento de estradas e outros materiais associados à atividade de manutenção das mesmas.

Os CDW podem conter betão (proveniente de fundações, pilares, lajes, entre outros), tijolos, argamassa, madeira, metal, telhas e materiais de embalagem (tais como, papel, cartão e película de plástico) (Zhao, Leefink e Rotter, 2010).

Segundo Zhao et al., existem três principais fatores que afetam as características de resíduos dos resíduos de construção:

- Tipo de estrutura (por exemplo, residencial, comercial, industrial, estrada, ponte);
- Dimensão da estrutura;
- Atividade em execução (por exemplo, construção, renovação, reparação, demolição).

Dolan et al (1999) identificaram os fatores que influenciam a quantidade de CDW produzidos (Zhao, Leefink e Rotter, 2010):

- O nível de crescimento e desenvolvimento económico global que impulsiona o nível de construção, renovação e demolição;
- Projetos especiais periódicos, tais como a renovação urbana, construção de estradas e de reparação de pontes, e outros fenómenos não planeados, tais como, desastres naturais;
- Disponibilidade e custo de opções de deposição e remoção;
- Legislação e regulamentos locais relativos à separação, reutilização e reciclagem de resíduos de construção e demolição;
- Disponibilidade de instalações de reciclagem e o nível de mercados para consumo do produto final.

Tabela 2. 2 - Quantidade de CDW gerada em diversas regiões de Portugal em 2006 (Coelho e Brito, 2012)

Região	Sub-região	Quantidade de CDW gerado Ton./ano
Norte	Minho-Lima	166.956
	Cávado	195.873
	Porto	208.215
	Douro	136.867
	Alto Trás-os-Montes	110.099
	Baixo Vouga	208.573
	Baixo Mondego	159.336
	Serra da Estrela	19.050
Lisboa	Zona metropolitana	350.617
	Península de Setúbal	231.042
Alentejo	Alentejo Litoral	54.317
	Alentejo Cental	89.388
	Baixo Alentejo	79.424
Algarve	Algarve	305.581
Ilhas	Madeira	133.350
	Açores	167.249

Pela análise da tabela anterior, rapidamente se conclui que em Lisboa e no Algarve são as regiões onde ocorreu maior produção de CDW. A produção de uma maior quantidade de resíduos nestas regiões pode justificar-se por maiores investimentos destinados para o desenvolvimento destas áreas. Na região algarvia, devido ao elevado número de turistas, foi necessário construir novas infraestruturas com capacidade para satisfazer as exigências impostas pelos mesmos. Relativamente a Lisboa, a maioria das empresas estão sediadas na capital e para além de precisarem de edificações para exercer as suas atividades, também atraem novos habitantes. Os investimentos provocam obras de demolição, restauração, reparação, ampliação e de novas construções, gerando-se desta forma uma maior quantidade de CDW nestas regiões do que nas restantes.

As principais atividades de engenharia civil que geram CDW incluem a construção, demolição e renovação de edifícios não residenciais (tais como, comercial, institucional e industrial) e de edifícios residenciais (tais como, casas unifamiliares, duplexes, multifamiliares) (Pichtel, 2003).

De salientar, que existe uma incerteza associada à constituição dos CDW, onde o material que constitui os resíduos de construção depende da fase de construção e das tecnologias aplicadas na construção de um edifício. Relativamente aos resíduos de demolição, a época e região em que o edifício foi construído, influencia a quantidade e composição dos mesmos.

Tabela 2. 3 – Composição dos CDW para alguns países da Europa em média (European Commission, 2011)

País	Dinamarca	Estónia	Finlândia	Républica Checa	Irlanda	Espanha	Alemanha
Ano	2003	2006	2006	2006	1996	2005	2007
Betão	25%	8%	33%	33%	39%	12%	70%
Alvenaria	6%			35%		54%	
Resíduos de outros materiais	22%	53%	-	-	51%	9%	-
Alfasto	19%	4%	-	-	2%	5%	27%
Madeira	-	-	41%	-	-	4%	-
Metal	-	19%	14%	-	2%	3%	-
Gesso	-	-	-	-	-	0%	0%
Plástico	-	-	-	-	-	2%	-
Diversos	28%	16%	12%	32%	6%	12%	3%

Tabela 2. 4- Composição dos CDW em diferentes regiões de Portugal (Coelho e Brito, 2012) (Pereira, Aguiar e Jalali, [s.d.])

Composição de CDW	Zona Norte (%)	Lisboa e península de Setúbal (%)
Solos de escavação, brita da restauração de pavimentos	40,0	73,16
Betão, alvenaria e argamassa	35,0	
Cerâmica	-	
Asfalto	6,0	13,4
Madeira	5,0	3,25
Metais (aço incluído)	5,0	2,19
Lamas de dragagem e perfuração	5,0	-
Outros resíduos	1,5	7,22
Papel, cartão	1,0	0,6
Plásticos	1,0	0,1
Vidro	0,5	0,08

2.4. DESTINO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Os produtores de CDW geram uma grande variedade de resíduos e, muitas vezes estes são depositados em locais clandestinos, dando origem a situações ambientalmente inapropriadas e incompatíveis com os objetivos nacionais e comunitários em matéria de desempenho ambiental (Pereira e Brito, 2001) (Associação Portuguesa do Ambiente).

A crescente preocupação em reduzir a deposição ilegal levou à criação de empresas cuja atividade assenta na recolha, transporte e deposição em locais apropriados (Pereira e Brito, 2001). Contudo, o serviço fornecido por estas empresas acarreta custos, que nem sempre são vistos como uma mais-valia. O custo associado ao depósito em alguns casos produziu efeitos contraditórios ao esperado, onde os empreiteiros consideram as taxas sobre os resíduos demasiado elevadas, optando pela colocação dos CDW em aterros clandestinos ou deposição ilegais (Silva, 2008).



Figura 2.1 - Deposição ilegal de CDW (Tessaro, Sá e Scremin, 2012)

Em alguns casos, pode ser conferido aos CDW um destino ‘amigo do ambiente’, através da reutilização e reciclagem dos elementos resultantes da atividade do sector da construção civil. Na Figura 2.2 está ilustrado um esquema de uma gestão eficiente de CDW. Numa primeira fase a separação e triagem dos resíduos realiza-se em obra, sendo que o restante material é sujeito ao processo de reciclagem ou de reutilização. Na maioria dos casos nem todo o material pode ser valorizado e, quando não é possível a valorização dos resíduos, estes são tratados e descontaminados para serem posteriormente depositados no aterro através de técnicas adequadas. Note-se que quantidade final de resíduos a depositar em aterro é substancialmente menor do que a quantidade de CDW inicialmente gerados em obra (Silva, 2008).

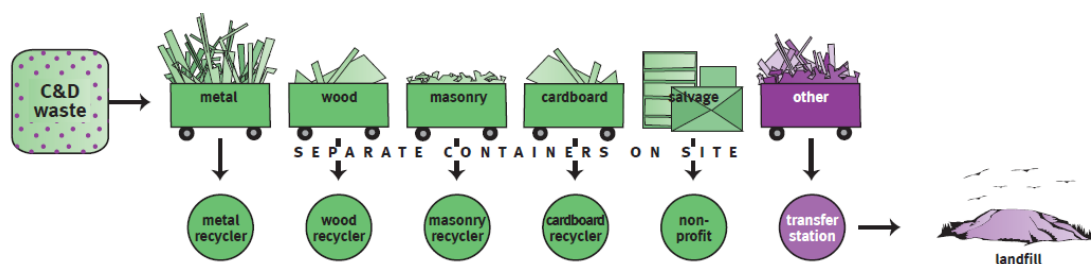


Figura 2. 2 -Percurso dos CDW com uma gestão eficiente (Department of Design and Construction, 2003)

Contudo, o percurso acima descrito não é mais praticado por inúmeras razões que serão citadas mais à frente neste capítulo. Na maioria dos casos não ocorre a separação nem triagem no local da obra (ver Figura 2.3). Os CDW gerados são transportados para um centro de tratamento de resíduos, onde se procede à separação e triagem dos materiais suscetíveis de serem reutilizados ou reciclados e o material restante tem como destino final o aterro. Este processo é menos eficiente do que analisado anteriormente, visto que o volume depositado no aterro é maior, para além de aumentar o risco de contaminação dos materiais numa fase inicial (Silva, 2008).

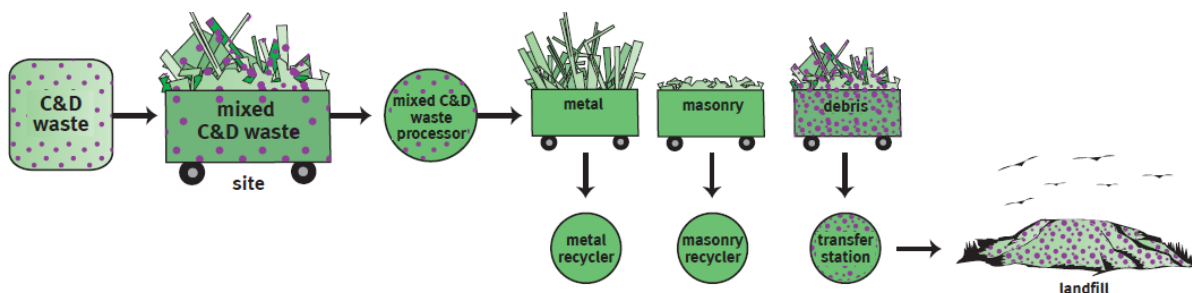


Figura 2. 3 - Percurso dos CDW com uma gestão pouco eficiente (Department of Design and Construction, 2003)

A situação tipicamente executada por pequenos empreiteiros, que ainda não estão sensibilizados para a proteção do meio ambiente, é a colocação dos CDW diretamente no aterro (ver figura 2.4). É evidente que este é o processo que provoca mais danos no meio ambiente. Para além do volume de resíduos a depositar ser muito superior aos casos anteriores, o risco de contaminação do solo também aumenta (Silva, 2008).

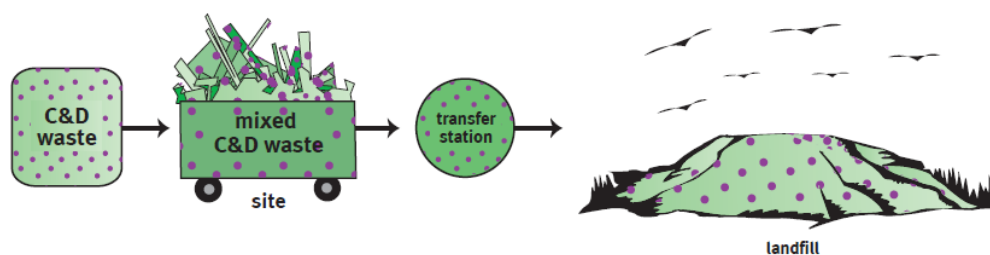


Figura 2. 4 - Percurso dos CDW sem gestão dos mesmos (Department of Design and Construction, 2003)

2.5. DEMOLIÇÃO SELETIVA OU DESCONSTRUÇÃO

Quando os edifícios são demolidos, grandes quantidades de resíduos podem ser geradas num curto período. As técnicas de demolição atualmente utilizadas podem ser (Pichtel, 2003):

- ✓ Implodir uma estrutura com explosivos;
- ✓ Usar um guindaste;
- ✓ Desconstruir.

A quantidade de resíduos produzidos devido à demolição pode ser minimizada, através de um processo conhecido como demolição seletiva, que maximiza a reutilização ou reciclagem dos materiais resultantes da demolição dos edifícios. A desconstrução concentra-se essencialmente na recuperação de elementos construtivos, tais como pavimentos, paredes, janelas, portas, tijolos, telhas e componentes estruturais. Alguns projetos têm demonstrado que os resíduos da demolição podem ser reutilizados em novas estruturas em construção no local de demolição (Pichtel, 2003).

A demolição seletiva tem como objetivo a produção de resíduos recicláveis e/ou reutilizáveis com o mínimo de heterogeneidade e sem contaminação dos materiais que impeçam o processo, ou que diminuam as qualidades finais do produto reciclado (Silva, 2008).

Dentro do mercado do sector da engenharia civil, a demolição tradicional tem vindo a ser lentamente substituída por demolição seletiva, em parte por razões ambientais mas principalmente por razões económicas. Um fator importante para esta mudança é a legislação em vigor que exige a separação dos CDW na fonte ou, quando tal operação não for possível, o encaminhamento dos resíduos para operadores licenciados que são, em princípio, capazes de executar a separação. No entanto, a desconstrução é raramente praticada, principalmente devido à falta de informação relativa a exemplos implementados, bem como condições económicas atraentes (Pacheco-Torgal *et al.*, 2013).

Existem diversas técnicas de desconstrução e para escolher qual deve ser aplicada em determinada situação, é necessário ter em conta um conjunto de fatores, tais como, do tipo de construção (que está relacionada com a idade edifício), mão-de-obra disponível, equipamento ou ferramentas utilizadas e as restrições de tempo. É importante referir que a técnica escolhida afeta a forma como a maior parte dos materiais recuperados são reciclados/reutilizados/incinerados e o custo do conjunto operação (Pacheco-Torgal *et al.*, 2013).

Para garantir a eficácia da desconstrução, deve-se efetuar um estudo e um planeamento prévio com todos os detalhes do edifício. Segundo Brito e Freire (2001), estes documentos devem contemplar os seguintes aspetos:

- Reunir e trabalhar estreitamente com o projetista, dono de obra, fiscalização e empreiteiro;
- Estabelecer uma lista de materiais reutilizáveis;

- Definir prioridades consoante os volumes previsíveis dos materiais a reciclar;
- Escolher os materiais a serem separados;
- Escolher a sequência de desmantelamento;
- Identificar locais ou espaços necessários onde vão ser separados, desmantelados e reciclados os materiais e os respetivos resíduos gerados;
- Manter informados, esclarecidos e motivados todos os operários no que se refere ao processo de reciclagem;

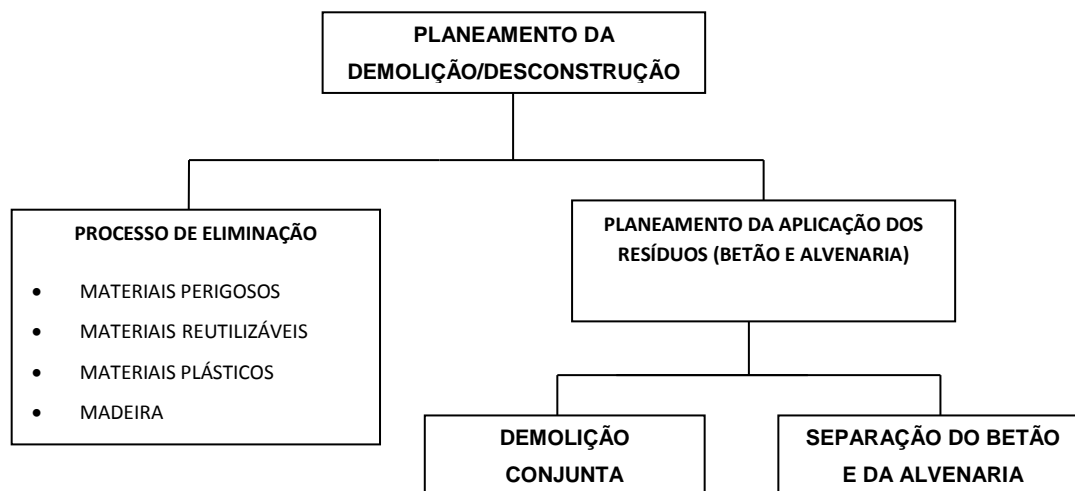


Figura 2. 5 - Processo de demolição seletiva/desconstrução (Gonçalves e Neves, 2003)

A maioria dos edifícios projetados não são adequados para uma demolição seletiva, sendo por isso necessário sensibilizar os projetistas para que, ao projetar determinada obra, tenham alguns cuidados, de modo a maximizarem o reaproveitamento/reciclagem dos resíduos. Assim sendo, os projetistas devem seguir algumas linhas básicas (Brito, 2004):

- Minimizar ao máximo a diversidade de materiais;
- Evitar a utilização de materiais tóxicos;
- Conceber um plano de desconstrução;
- Montagens inseparáveis devem ser do mesmo material;
- Pormenorizar para evitar o contacto com o solo e a decomposição de materiais;
- Identificar os tipos de materiais utilizados.

2.5.1. VANTAGENS DA DEMOLIÇÃO SELETIVA

As vantagens associadas ao processo de desconstrução incluem (Pichtel, 2003)(Brito, 2004):

- Menores custos: A desconstrução pode ser mais económica que a demolição tradicional porque os custos são compensados pela revenda de materiais recuperados durante o processo;
- Evita custos de eliminação: A maioria dos materiais das estruturas desconstruídas podem ser recuperados, diminuindo assim os detritos depositados em aterros;

- Redução de custos em taxas ambientais e colocação em aterro;
- Aumento de oportunidades de emprego direto e indireto;
- A desconstrução seletiva encontra-se em conformidade com a legislação em vigor, pois em muitos países é obrigatória uma redução substancial na quantidade de resíduos sólidos dispostos em aterros;
- Criação de novos nichos de mercado e de centrais regionais e nacionais de armazenamento e distribuição;
- Em alguns casos, os materiais de construção recuperados poderão ser mais baratos e de melhor qualidade: Materiais reutilizados são menos caros e, por vezes, de maior qualidade do que novos materiais. Por exemplo, algumas estruturas de madeira em bases militares contêm madeira velha;
- Impactos ambientais reduzidos: A desconstrução tem menos impactos ambientais sobre propriedade adjacente porque cria menos poeira e ruído do que a demolição tradicional;
- Oferece aos consumidores e construtores uma alternativa em relação à compra de produtos de construção fabricados a partir de recursos virgens.

2.5.2. IMPEDIMENTOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA DEMOLIÇÃO SELETIVA

Existem alguns inconvenientes associados ao método de demolição seletiva quando comparado com a demolição tradicional, tornando-a menos apelativa junto do sector. Um dos pontos fracos é relativo aos custos diretos, sendo estes substancialmente mais elevados do que os custos praticados pela demolição tradicional. O aumento de custo é provocado pela necessidade de recorrer a mais mão-de-obra, equipamento mais ligeiro e pelo aumento do período de execução (Brito, 2004).

A prática de demolição seletiva não é muito recorrente devido à existência de algumas barreiras, entre as quais se destacam (Brito, 2004):

- Falta de informação, competências e ferramentas relativas à desconstrução e conceção para a desconstrução;
- Falta de mercado instalado suficientemente grande para os produtos;
- Conceção atual inadequada dos edifícios;
- Relutância dos construtores que preferem sempre produtos novos;
- Obstáculos legais, nomeadamente na responsabilização civil relativamente aos componentes em ‘segunda mão’ e na quantificação dos fatores de segurança;
- Produtos compósitos que podem contaminar os produtos de desconstrução se não forem adequadamente processados.

Em suma, a demolição seletiva visa maximizar o reaproveitamento e reutilização dos CDW, proporcionando por sua vez um conjunto de vantagens positivas. Num futuro próximo, as metas exigidas pela União Europeia para a reciclagem de resíduos serão cada vez mais exigentes, sendo necessário que este processo seja encarado como um negócio em ascensão. No que concerne ao desenvolvimento de técnicas de desconstrução em Portugal, estas não devem ser adquiridas a qualquer custo, sendo perentória uma análise e estudo dos casos de sucesso e fracassos ocorridos noutros países onde esta prática já é usual. (Freire e Brito, 2001)

2.6. LEGISLAÇÃO APLICÁVEL AOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM PORTUGAL

2.6.1 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO EM PORTUGAL

Segundo Ekanayake e Ofori, os problemas ambientais resultantes da deposição de CDW são um motivo de preocupação devido aos impactos ambientais que os depósitos ilegais têm sobre a cidade e a envolvente. Para a minimização dos mesmos tem-se estimulado o desenvolvimento de soluções ambientalmente sustentáveis. Neste contexto, a legislação ambiental tornou-se mais rigorosa. No caso específico dos CDW, a legislação específica tem procurado isolar situações danosas para o ambiente, tais como, a eliminação não controlada de CDW e sobre-utilização dos recursos naturais pelo sector da construção civil (Melo, Gonçalves e Martins, 2011).

O regime jurídico de gestão de resíduos foi pela primeira vez aprovado em Portugal por meio do Decreto-Lei nº 488/85 em 1985. A evolução rápida do direito comunitário levaria à revogação daquele diploma pelo Decreto-Lei nº 310/95 em 1995, atualmente em vigor (Ministério Do Ambiente, 2006). Contudo, a criação deste último diploma não foi suficiente para cobrir todas as necessidades existentes, sendo necessário um novo documento, que deveria reger-se por (Ministério Do Ambiente, 2008):

- ✓ Princípio da prevenção, dando prevalência à valorização dos resíduos em vez da sua eliminação;
- ✓ Estabelecer uma preferência tendencial pela reutilização sobre a reciclagem;
- ✓ Minimizar a produção de resíduos e assegurar a sua gestão sustentável.

Em 2006, para responder a algumas das necessidades anteriormente enunciadas e à falta de legislação específica até a data, surgiu o Decreto-Lei 178/2006. Este impõe regras para licenciamento relativas ao armazenamento, triagem, entre outros (CCDR, 2011).

A partir de 2008, Portugal adotou um regime jurídico específico para a gestão de CDW, designado por Decreto-Lei 46/2008, que contribuiu para a implementação de novas políticas relacionadas com a reciclagem e a reutilização de resíduos. O novo quadro jurídico para a gestão de resíduos tem por objetivo criar condições jurídicas que promovam os seguintes objetivos: redução na produção de resíduos e os riscos associados, a triagem de resíduos na sua origem, de reciclagem, e outras formas de reutilização dos CDW (Melo, Gonçalves e Martins, 2011).

Em 2011, o Decreto-Lei nº46/2008 foi alterado por Decreto-Lei nº73/2011, com a intenção de combater lacunas até então existentes.

A legislação em vigor em Portugal estabelece um conjunto de medidas com o intuito de minimizar as consequências dos CDW no meio ambiente, visa também ao incentivo da reciclagem e reutilização dos mesmos. Os documentos existentes em Portugal que dão apoio à gestão de resíduos são os seguintes (CCDR, 2011):

- ✓ Decreto-Lei nº178/2006 de 5 de Setembro;
- ✓ Decreto-Lei nº73/2011 de 17 de Junho;
- ✓ Portaria 209/2004 de 23 de Março;
- ✓ Portaria n.º 335/97 de 16 de Maio;
- ✓ Portaria n.º 417/2008 de 11 de Junho;

- ✓ Portaria n.º 209/2004 de 3 de Março;
- ✓ Decreto-lei n.º 152/2002 de 23 de Maio.

2.6.1.1.DECRETO-LEI Nº178/2006

O diploma pretende introduzir novos instrumentos no ordenamento jurídico português, desde logo aqueles que se prendem com uma melhor gestão da informação em matéria de gestão dos resíduos. O decreto-lei aplica-se às operações de gestão de resíduos, compreendendo toda e qualquer operação de recolha, transporte, armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação de resíduos, bem como às operações de descontaminação de solos e à monitorização dos locais de deposição após o encerramento das respetivas instalações (Ministério Do Ambiente, 2006).

Do Decreto-Lei nº178/2006 destacam-se os seguintes artigos (Ministério Do Ambiente, 2006):

- Artigo 3.º: definição de resíduos de construção e demolição;
- Artigo 4.º: as operações de gestão de resíduos devem decorrer preferencialmente em território nacional, reduzindo ao mínimo possível os movimentos transfronteiriços de resíduos, de acordo com o princípio da auto-eficiência;
- Artigo 5.º: segundo o princípio da responsabilidade pela gestão, a gestão e os custos são da responsabilidade do respetivo produtor;
- Artigo 6.º: a partir do princípio da prevenção e redução, o objetivo da política de gestão de resíduos é evitar e reduzir a sua produção bem como o seu carácter nocivo, devendo a gestão de resíduos evitar pelo menos reduzir o risco para a saúde humana e para o ambiente causado pelos resíduos sem utilizar métodos suscetíveis de gerar efeitos adversos sobre o ambiente;
- Artigo 7.º: a gestão de resíduos deve respeitar o princípio da hierarquia das operações de gestão de resíduos, tal que, deve assegurar a seguinte ordem:
 1. Reduzir a quantidade de resíduos;
 2. Reciclagem;
 3. Valorização;
 4. Eliminação.

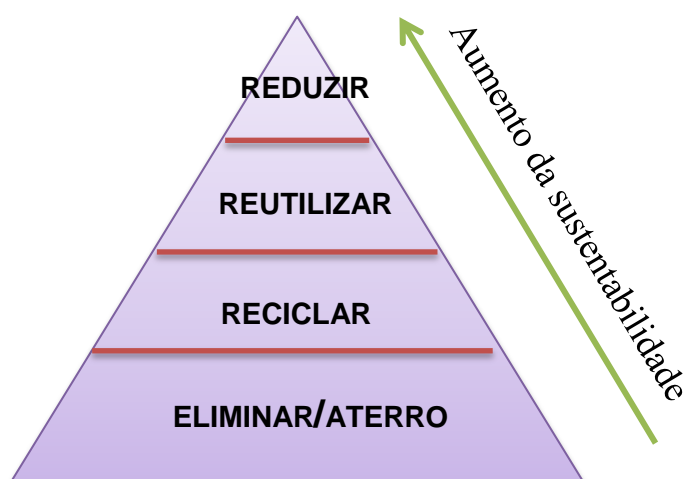


Figura 2. 6 - Adaptação da hierarquia da gestão de resíduos (Spies, 2009)

- Artigo 8.º: o princípio de regulação de gestão dos resíduos rege-se à proibição das operações de armazenagem, tratamento, valorização e eliminação de resíduos não licenciadas nos termos do presente decreto-lei. Também proíbe a descarga em locais não licenciados para a realização de operações de gestão de resíduos. E por fim, a gestão de resíduos é realizada de acordo com os princípios gerais fixados nos termos do presente decreto-lei.

O diploma ainda estabelece que as operações relativas à armazenagem, tratamento, triagem, valorização e eliminação de CDW estejam de acordo com o regime de licenciamento estabelecido no decreto e, ainda enumera o valor monetário das respetivas coimas em caso de incumprimento de algum dos artigos.

2.6.1.2. DECRETO-LEI Nº73/2011

O Decreto-Lei nº 46/2008 criou condições para a aplicação, inclusive na fase de projeto, de medidas de prevenção da produção de CDW e da sua perigosidade, aliando a utilização das melhores tecnologias disponíveis à utilização de materiais com melhor potencial de reutilização e reciclagem (AmbienteOnline, 2008). Este permitiu estabelecer o regime das operações de gestão de resíduos resultantes de obras, demolições de edifícios ou de derrocadas, compreendendo a prevenção, reutilização, operações de recolha, transporte, armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação deste tipo de resíduos (Portaria n.º 417/2008).

Contudo, o diploma anteriormente enunciado foi substituído pelo Decreto-Lei nº73/2011, tendo a finalidade de circunscrever novas metas propostas pelo governo em relação à gestão de resíduos, tais como (Apambiente, 2015):

- Reforçar a prevenção da produção de resíduos e fomentar a sua reutilização e reciclagem;
- Promover o pleno aproveitamento do novo mercado organizado de resíduos, como forma de consolidar a valorização dos resíduos, com vantagens para os agentes económicos, bem como estimular o aproveitamento de resíduos específicos com elevado potencial de valorização;
- Clarificar conceitos-chave como, as definições de resíduo, prevenção, reutilização, preparação para a reutilização, tratamento e reciclagem, e a distinção entre os conceitos de valorização e eliminação de resíduos;
- Prever a aprovação de programas de prevenção e estabelece metas de preparação para reutilização, reciclagem e outras formas de valorização material de resíduos, a cumprir até 2020;
- Incentivar a reciclagem que permita o cumprimento das metas estabelecidas, e de preservação dos recursos naturais;
- Prever a utilização de pelo menos 5% de materiais reciclados em empreitadas de obras públicas;
- Definir requisitos para que substâncias ou objetos resultantes de um processo produtivo possam ser considerados subprodutos e não resíduos;
- Definir critérios para que determinados resíduos deixem de ter o estatuto de resíduo;

- Introduzir o mecanismo da responsabilidade alargada do produtor, tendo em conta o ciclo de vida dos produtos e materiais e não apenas a fase de fim de vida, com as inerentes vantagens do ponto de vista da utilização eficiente dos recursos e do impacto ambiental.

2.6.1.3. PORTARIA N.º 335/97

O objetivo desta portaria é possibilitar uma fiscalização e controlo das transferências de resíduo mais eficaz dentro do território nacional (Ministérios Da Administração Interna, Do Equipamento, Do Planeamento e Da Administração Do Território, 1997).

2.6.1.4. PORTARIA N.º 417/2008

O atual regime de transporte de resíduos, regulamentado pela Portaria n.º 335/97, de 16 de Maio, tem revelado algum desajustamento em relação às especificidades do sector da construção. Neste contexto, numa lógica de adaptação ao sector e também de simplificação, surge a Portaria n.º 417/2008 que prevê a definição de uma guia específica para o transporte de CDW (Diário da república, 2008).

2.6.1.5. PORTARIA Nº 209/2004

A portaria define uma Lista de Resíduos que assegura a identificação e classificação de resíduos, ao mesmo tempo visa facilitar um perfeito conhecimento pelos agentes económicos do regime jurídico a que estão sujeitos (Ministérios Da Economia, Da Agricultura, Desenvolvimento Rural E Pecas, Da Saúde E Das Cidade, 2003).

2.6.1.6. DECRETO-LEI Nº 152/2002

O diploma estabelece as normas aplicáveis aos CDW para colocação em aterro (Diário Da República, 2002).

2.7. UTILIZAÇÃO DE CDW EM OBRA

Os CDW poderão se aplicados em vários campos do domínio da engenharia civil, tais como (Gonçalves e Neves, 2003):

- Construção de aterros e taludes;
- Bases e sub-bases de estradas;
- Material de enchimento;
- Constituição das camadas drenantes;
- Betão betuminoso;
- Betão de cimento.

Segundo o Artigo nº.7 do Decreto-Lei nº46/2008, a utilização dos resíduos de construção e demolição em obra é realizada de acordo com as normas técnicas nacionais e comunitárias aplicáveis. Em caso de inexistência das mesmas utilizam-se as especificações técnicas definidas pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

As normas técnicas atualmente em vigor que estão relacionadas com aplicação de agregados são as seguintes (Gonçalves e Neves, 2003):

- NP EN 12620:2002+A1:2010, “Agregados para betão”;
- EN 13055-1:2005, “Agregados leves Parte 1: Agregados leves para betão, argamassas e caldas de injeção”;
- NP EN 13055-2:2011, “Agregados leves Parte 2: Agregados leves para misturas betuminosas e tratamentos superficiais e para aplicações em camadas de materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos”;
- EN 13139:2005, “Agregados para argamassa”;
- EN 13242:2013, “Agregados para materiais ligados e não ligados utilizados em aplicações de engenharia civil e construção de estradas”;
- NP EN 13383-1:2010, “Enrocamentos Parte 1: Especificações”;
- EN 13450:2013, “Agregados para balastro de via-férrea”;
- EN 1744:6 2011, “Ensaio das propriedades químicas dos agregados Parte 6: Determinação da influência do extrato de agregados reciclados no tempo de início de presa do cimento”.

No que concerne às especificações do LNEC relativas ao uso do CDW são as seguintes:

- E 471 – 2009: Guia para a utilização de Agregados Reciclados Grossos em Betões de Ligantes Hidráulicos;
- E 472 – 2009: Guia para a Reciclagem de Misturas Betuminosas a Quente em Central;
- E 473 – 2009: Guia para a Utilização de Agregados Reciclados em Camadas Não Ligadas de Pavimentos;
- E 474 – 2009: Guia para a Utilização de Resíduos de Construção e Demolição em Aterro e Camada de Leito de Infraestruturas de Transporte.

2.8. RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

2.8.1. ENQUADRAMENTO GERAL

A consciencialização crescente da população em relação à preservação ambiental levou à criação de inúmeras medidas para reduzir os impactos negativos que a atividade humana provoca no meio ambiente, levando a população a reciclar e reutilizar os resíduos. Esta mudança de comportamento acarreta inúmeras vantagens, como redução do consumo de matéria-prima virgem e diminuição da necessidade de espaços destinados à colocação dos CDW (Brito e Gomes, 2001).

Em Portugal a maioria dos CDW são enviados para aterro. Segundo Pereira, cerca de 76 % dos CDW são depositados em aterros, 11% são reutilizados e 4% são incinerados, o que deixa cerca de 9% para ser reciclado. Embora existam algumas iniciativas valiosas, a realidade atual é clara: a quantidade de CDW reciclados/reutilizados em Portugal é muito baixa em comparação com outros países como o Reino Unido, Países Baixos, Bélgica, Áustria e Dinamarca, onde mais de 70% dos CDW são reciclados. Atualmente, a quantidade de resíduos reutilizados ou reciclados em Portugal ainda está muito aquém dos valores exigidos pela Comunidade Europeia, que afirma que pelo menos 70% de todos os CDW devem ser preparados para a reutilização e reciclagem até 2020. Além disso, a

qualidade dos produtos reciclados a partir de instalações de reciclagem de CDW em Portugal ainda é baixa, limitando futuras aplicações (Coelho e Brito, 2012).

Um dos principais obstáculos para a prática de reciclagem dos CDW é a incerteza económica associada ao projeto. Contudo, já existem vários estudos sobre a viabilidade económica da reciclagem de CDW. Destacando-se casos de sucesso em países como a Alemanha e Holanda, onde existem fábricas com tamanho considerável e bastante desenvolvidas tecnologicamente que permitem que a reciclagem seja um negócio rentável.

A reciclagem de subprodutos resultantes da demolição é um processo complexo de análise onde a relação benefício-custo deve ser ponderada relativamente à sua ação ambiental, para que esta possa atingir o sucesso económico, várias entidades (como, governo, empreiteiros, donos de obra, fornecedores de materiais, entre outros). Portanto é perentório definir um conjunto de orientações para atingir uma melhor qualidade dos produtos resultantes da reciclagem e que o processo seja economicamente viável (Brito e Gomes, 2001).

Segundo Brito e Gomes, a proficiência da atividade de reciclagem depende essencialmente do custo do processo de reciclagem, os custos associados aos escombros (tais como, transporte, impostos e custos de deposição no vazadouro) e da diferença de preço entre materiais novos e materiais reciclados.

2.8.2. PROCESSAMENTO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

O processo de reciclagem é influenciado por alguns fatores, como a região, a quantidade e qualidade de CDW, economia do país e tecnologia.

Segundo Freire e Brito, os materiais que podem ser reaproveitados provêm, essencialmente, de trabalhos relacionados com restauração ou ampliação de edificações, demolições, execução de infraestruturas, ferrovias, estradas, aeroporto e portos.

Os locais e os equipamentos onde se executam as operações relativas ao processo de reciclagem, denominam-se centrais de reciclagem. Estas podem ser de separação/triagem ou de trituração, podendo ser móveis ou fixas. As centrais móveis permitem que o processo seja executado no local onde ocorre a demolição, evitando os custos do transporte (Freire e Brito, 2001).



Figura 2. 7 - Exemplo de uma central móvel (Gonçalves *et al.*, 2015)



Figura 2. 8 - Exemplo de uma central fixa (Gonçalves *et al.*, 2015)

Efetuar a fragmentação e seleção dos CDW em central fixa ou no próprio local de demolição depende de alguns fatores, entre os quais se destacam (Silva, 2008):

- Quantidade de CDW expectável de se produzir;
- Espaço e tempo disponíveis no local da demolição;
- Capacidade técnica e a disponibilidade das máquinas;
- Qualidade requerida para os agregados, em função do seu destino final;
- Distância entre o local de demolição e a central mais próxima.

O processamento dos CDW habitualmente inclui quatro operações principais: triagem, redução primária, britagem e peneiração. A triagem serve para a eliminação de componentes indesejáveis (como, plásticos, gesso, borrachas e papel) que prejudicam as características técnicas e ambientais do material reciclado. Relativamente à redução primária, os CDW sofrem uma redução de dimensão e ocorre a remoção dos materiais metálicos ainda existentes. Na operação de britagem, os resíduos sofrem nova redução de dimensão. Por fim, a peneiração serve para a classificação da granulometria do material reciclado (LNEC, 2006).

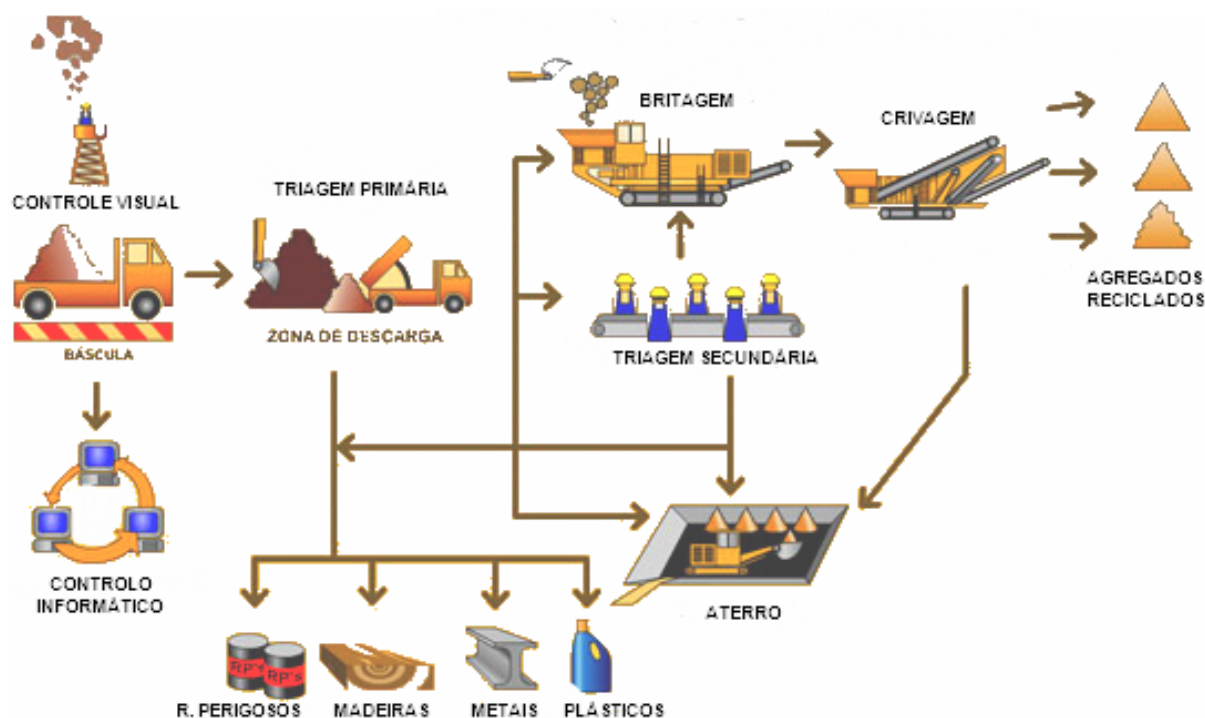


Figura 2. 9 - Esquema de processamento de CDW de uma central fixa (Gonçalves *et al.*, 2015)

Segundo Penzel e Kircher, as principais componentes para a gestão eficaz de resíduos em instalações de reciclagem compreendem (HIETE, 2013):

- Uma zona de armazenamento com um alimentador que serve para depósito, garantindo um fornecimento constante de CDW;
- Pré-peneiração para remover a fração fina, incluindo solo;
- Um triturador, como exemplo, por impacto ou um britador de mandíbula, para reduzir a dimensão dos resíduos;
- Peneiração de controlo para separar partículas maiores que precisam de uma nova redução;
- Ímã para remover metais ferrosos;
- Dispositivo mecânico de classificação, tal como um separador de ar comprimido para remover material que pode danificar a qualidade final tais como madeira, papel, plásticos, entre outros;
- Triagem manual para remoção do material que pode contaminar as substâncias resultantes do processo de reciclagem;
- Transportadores de remoção
- Equipamento para efetuar uma segunda peneiração e mistura, para conseguir a dimensão pretendida dos agregados reciclados.

O processo de reciclagem de CDW deve permitir a obtenção de materiais que satisfaçam as exigências técnicas e ambientais para a aplicação a que se destinam. O aproveitamento destes resíduos será tanto maior quanto menor a quantidade de poluentes e matérias indesejáveis presentes no CDW (LNEC, 2006). Desta forma, é importante a aplicação da demolição seletiva porque esta procura retirar o melhor partido possível dos CDW que se vão gerar, separando-os logo de início, evitando assim a

limitação das potencialidades dos detritos reciclados resultante da sua contaminação por outros materiais (Gonçalves e Neves, 2003).

Segundo Gonçalves e Neves, antes da demolição do edifício, deve-se realizar uma inspeção à construção a demolir para averiguar a presença de materiais nocivos, identificar o tipo e o uso da construção e por fim, avaliar as quantidades de cada tipo de material presente na estrutura. Este conjunto de informação permitirá estabelecer um plano de demolição e separação dos detritos e desta forma, aumentar o potencial de reciclagem dos detritos.

Como já referido inicialmente, a escolha das técnicas para a reciclagem dos resíduos depende de alguns fatores, tais como (HIETE, 2013):

1. Dos resíduos de construção e demolição:
 - i) Tipo e composição dos CDW;
 - ii) Quantidade de CDW esperado;
 - iii) Dimensões das peças dos CDW;
2. Dos agregados reciclados pretendidos:
 - i) Tipos de CDW a serem separados;
 - ii) Forma das partículas, dimensão e precisão da peneiração;
 - iii) Grau de contaminação na classificação;
3. Condições locais:
 - i) Espaço disponível;
 - ii) Requisitos legais, por exemplo, poeira e emissões de ruído, proteção das águas subterrâneas;
4. Fatores económicos:
 - i) Encargos para aceitar diferentes tipos de CDW produzidos no mercado;
 - ii) Os preços de venda de diferentes tipos de produtos de reciclagem;
 - iii) Custo do processamento de CDW que é a soma das seguintes parcelas:
 - Custos fixos de diferentes tipos de centrais fixas ou móveis;
 - Custos operacionais da central de reciclagem, dependente, em particular, dos custos da energia consumida e da mão-de-obra;
 - Custos de manutenção.

2.8.3. MATERIAIS RESULTANTES DO PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS

Do processamento de materiais resulta a criação de novos materiais que terão novas aplicações, das quais se destacam (Silva e Salinas, 2001):

- Betão poderá ser utilizado como agregado em novos betões;

- Madeira poderá ser utilizada como fonte energética ou como elemento de novos componentes de madeira;
- Metal poderá ser utilizado como matéria-prima na indústria metalúrgica;
- Embalagens de papel, cartão e plástico poderão ser utilizadas na integração de novos produtos.

A cada tipo de material resultante do processamento é associado um determinado potencial de prevenção, reutilização ou reciclagem, como se pode observar na Tabela 2.4.

Tabela 2. 2 - Potencial para reaproveitamento de resíduos (Silva, 2008)

Resíduo	Potencial de Prevenção	Potencial de Reutilização	Potencial de Reciclagem	Fracção Residual (para destino final)
Inertes	Elevado	Médio	Elevado	Quando contaminado ou misturado
Madeira	Reduzido	Elevado	Elevado	Madeira contaminada com substâncias tóxicas
Metais	Reduzido	Reduzido	Elevado	Quando contaminado ou misturado
Vidro	Reduzido	Reduzido	Elevado	Quando contaminado ou misturado
Papel/Cartão (embalagens)	Elevado	Médio	Médio	Embalagens contaminadas com substâncias tóxicas
Plástico (embalagens)	Elevado	Médio	Médio	Embalagens contaminadas com substâncias tóxicas

2.8.4. IMPEDIMENTOS PARA O DESENVOLVIMENTO DO PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A reciclagem é frequentemente mencionada como a melhor maneira de gerir os CDW, contudo ainda existem vários obstáculos ao uso de agregados reciclados. Destacando-se os seguintes (Silva, Brito e Dhir, 2014):

- A falta de confiança entre os clientes e os prestadores de serviços;
- Custo do agregado natural mais baixo que o agregado reciclado;

- A falta de normas e especificações para aplicação dos agregados reciclados em obra;
- Baixa qualidade do produto final, devido à falta de conhecimento e/ou interesse dos proprietários das empresas de reciclagem de CDW;
- Distância entre o local de demolição e as instalações onde ocorre a reciclagem de CDW;
- A falta de consistência da qualidade de agregados reciclados que pode satisfazer a demanda existente.

Um dos pontos fracos associados aos agregados reciclados é a distribuição geográfica dos mesmos, que é muito reduzida em comparação aos agregados naturais, sendo que a distribuição destes agregados é bastante abundante em Portugal (Gonçalves e Brito, 2001).

Na esperança de encorajar e promover o uso de agregados reciclados, a Diretiva Europeia União 2008/98/CE encoraja a reutilização e reciclagem de resíduos, esperando-se que em 2020, as novas estruturas sejam constituídas pelo menos por 5% de material reciclado.

2.8.5. COMO PROMOVER A UTILIZAÇÃO DA REUTILIZAÇÃO E RECICLAGEM DE CDW

A promoção da reciclagem e reutilização é praticada por alguns Estados membros da União Europeia, destacando-se algumas iniciativas relevantes, tais como (Silva e Salinas, 2001):

- Impedimentos ou restrições na deposição de detritos;
- Uso de mono-aterros (aterros que apenas admitem um tipo de resíduo homogéneo) que permitam num futuro próximo o tratamento e recuperação;
- Aplicação de medidas fiscais punitivas (taxas);
- Aplicação de incentivos fiscais (subsídios);
- Suporte financeiro para o desenvolvimento de projetos de investigação e desenvolvimento;
- Recetividade de um mercado de troca de resíduos;
- Criação de normas e padrões aplicáveis aos materiais reciclados;
- Criação de centros de reciclagem e iniciativas por parte do sector público para os estabelecer.

De notar que a legislação atualmente em vigor não é suficientemente rígida para que a reciclagem seja praticada na maioria dos CDW gerados em Portugal. Por exemplo, o custo dos agregados naturais é igual ou inferior ao custo dos agregados reciclados, e como a grande maioria dos consumidores ainda não confiam neste material, continuam a escolher os agregados naturais; ou as taxas de deposição em aterros não são suficientemente altas para impedir a sua prática. O governo deve intervir e criar uma legislação eficaz que incentive a reciclagem de CDW. Só depois desta mudança legislativa, poder-se-á sensibilizar os engenheiros e empreiteiros para práticas sustentáveis na construção.

Verifica-se que os países com taxas elevadas de reciclagem, a legislação e a fiscalização são bastantes eficazes, bem como vontade política. Da análise da conjuntura atual, pode concluir-se então (Silva, 2008):

- Existe tecnologia adequada;
- A reciclagem e a reutilização são já uma realidade e um objetivo na Europa;

- É necessário existirem objetivos e vontade política para reciclar mais, em Portugal.

A ação dos governantes é primordial para facilitar a reutilização dos resíduos das demolições, e deverá incidir sobre (Silva, 2008):

- Formulação de metas políticas e objetivos nacionais, em termos de percentagens obrigatórias de reciclagem;
- Implementação de legislação e sistemas de fiscalização apropriados;
- Intervenção nos preços, através da criação de taxas ambientais para o poluidor e de subsídios para o reciclador;
- Elaboração de normas nacionais sobre as atividades produtoras e recicladoras;
- Implementação de um sistema de controlo de qualidade sobre as atividades recicladoras.

2.9. IMPACTOS POSITIVOS ASSOCIADOS À GESTÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Uma gestão dos CDW ‘amiga do ambiente’ acarreta inúmeras vantagens a diversos níveis: económicos, sociais e de saúde.

A nível económico existe um desenvolvimento de novas indústrias, levando a criação de novos postos de trabalho quer para mão-de-obra especializada quer para mão-de-obra sem qualificação. Também proporciona uma redução de custos para o responsável pela gestão dos resíduos relativamente à eliminação de CDW e de transporte.

Relativamente às vantagens ambientais destacam-se as seguintes:

- Reciclagem desencoraja o despejo ilegal e reduz os efeitos ambientais negativos sobre águas subterrâneas, das águas superficiais, ar, flora e fauna e paisagem;
- Redução de emissões de CO₂: menor produção de energia aquando da reciclagem;
- Redução de impactos visuais;
- Melhoria da qualidade do ar;
- Menor consumo de recursos naturais;
- Redução do volume de resíduos a colocar em aterro.

Por fim, uma gestão de CDW sustentável ainda proporciona algumas vantagens a nível social como por exemplo, o reaproveitamento dos resíduos implica uma redução da quantidade de aterros. Esta redução evita a criação de novos aterros, permitindo desta forma uma melhor utilização do espaço público e uma redução dos riscos para a saúde pública gerados por depósitos ilegais ou por incineração incontrolada de CDW (Spies, 2009).

2.10. ESTUDOS REALIZADOS COM AGREGADOS DE CDW RECICLADOS PARA UTILIZAÇÃO NO BETÃO

Existem vários ensaios que visam analisar a utilização de agregados reciclados no betão. Estes estudos avaliam as alterações de comportamento das propriedades do betão com agregados reciclados (RA), destacando-se os seguintes resultados:

- Alves et al. (2014) analisaram a incorporação de RA de cerâmica provenientes de tijolos em betão e concluíram que a diminuição aos 28 dias da resistência à compressão foi inferior a 10% para uma substituição plena dos NA por RA de tijolo;
- Alves et al. (2014) verificaram que ocorreu um aumento na resistência à abrasão de 31,4% e 49,8% quando 100% de partículas grossas de NA foram substituídas por RA de tijolos e de louças sanitárias, respetivamente;
- Brito et al. (2005) concluíram que há uma correlação aproximadamente linear entre o aumento da resistência à abrasão com o rácio de NA substituído por RA de tijolo cerâmico. A justificação desta tendência reside na ligação mais eficaz entre os agregados cerâmicos e pasta de cimento, devido à maior porosidade dos RA;
- Kou et al. (2004) avaliaram a resistência à tração aos 1, 4, 7, 28 e 90 dias de betão com RA grossos de CDW, obtendo as seguintes perdas: 34%, 26%, 11%, 17% e 8% tendo concluído que a influência negativa da utilização dos RA desvanece parcialmente ao longo do tempo;
- Kou et al. produziram betão com RA grossos de CDW com 0%, 20%, 50% e 100% de substituição e determinaram a resistência do betão aos 7, 28 e 90 dias, obtendo perdas de 33%, 37% e 31%;
- Levy e Helene (2001) concluíram que a durabilidade do betão com uma resistência de 30 Mpa, não é influenciada pela utilização de RA de alvenaria ou de betão, quando a percentagem de substituição é inferior a 20%.
- Matias e Brito (2004) verificaram uma tendência crescente de perda de trabalhabilidade com o aumento de percentagem de substituição de NA por RA com a mesma curva granulométrica. Ainda foi verificada uma redução da massa volúmica do betão perfeitamente proporcional à taxa de incorporação de agregados reciclados. Os autores concluíram que estas tendências devem-se aos seguintes fatores: maior absorção de água dos RA, índice de forma menor (formas mais alongadas) nos reciclados do que nos naturais e menor massa volúmica nos agregados reciclados;
- Medina et al. (2014) analisaram a viabilidade de produção usando RA grossos de CDW com um elevado teor de asfalto e material leve. O uso de 50% destes RA causou aos 28 dias uma perda de resistência à compressão até 18%;
- Oliveira et al. (2004) estudaram a resistência à compressão do betão com substituição de material grosseiro NA com RA em 10%, 20%, 30%, 40% e 100%. Os RA utilizados no ensaio tiveram proveniência essencialmente de betão esmagado. A fim de produzir uma mistura com 100% de RA grosso com a mesma resistência que o betão de referência, os autores precisaram de aumentar o teor de cimento de 378 kg/m³ para 475 kg/m³;
- Poon et al. (2007) estudaram a influência da substituição de NA de maiores dimensões por RA na resistência mecânica. Foi utilizado RA de CDW de uma central de reciclagem tendo produzido misturas de betão com 10%, 20%, 50%, 80% e 100% de substituição, mantendo a razão água/cimento constante. A substituição resultou em perdas de resistência à compressão de 24%, 16%, 19% e 10%, respetivamente;
- Santos et al. realizaram vários ensaios no betão para determinar a influência de utilização de agregados grossos no betão, sendo estes ensaios relativos à avaliação das propriedades de resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Os investigadores substituíram diferentes percentagens de agregados naturais (NA) por agregados reciclados e concluíram que ocorreu

uma diminuição dos valores das propriedades em estudo onde se realizou a substituição em comparação com um betão de referência (constituído por 100% de NA), sendo a diminuição tanto maior quanto maior a percentagem de agregado substituído;

- Zong et al. (2014) realizaram estudos referentes à utilização de RA de tijolo em betão e concluíram que a substituição compromete o seu desempenho mecânico e aumenta a permeabilidade. Os resultados obtidos resultaram do aumento da porosidade dos RA e os seus efeitos sobre a microestrutura do betão;

Dos estudos anteriormente enunciados, destaca-se a influência da composição dos RA de CDW nos resultados finais.

Importa ainda salientar que os RA têm uma taxa de absorção mais elevada do que NA, sendo necessário recorrer a adjuvantes e a uma maior percentagem de cimento para se conseguir manter a trabalhabilidade do betão sem alterar a relação água/cimento, que conduziria a uma perda de resistência (Gonçalves e Brito, 2001).

De notar que na maioria dos ensaios, o material em análise são os agregados de maiores dimensões. Muitos dos autores consideram que a utilização de agregados de menores dimensões provoca uma redução das propriedades do betão. Segundo Jiménez, o material reciclado é geralmente classificados em dois grupos de acordo com a sua composição. O primeiro grupo é composto principalmente de partículas de betão e agregados não ligados, contudo o segundo contém cerâmica, argamassa, asfalto e impurezas nocivas tais, como gesso (JIMÉNEZ, 2013). Os agregados reciclados contêm impurezas que devem ser identificadas, quantificadas e eliminadas, se possível, para não comprometem o desempenho futuro da estrutura. É de salientar que a quantidade de impurezas presentes nos RA será tanto maior quanto menor a dimensão dos agregados, tornando as partículas de dimensões reduzidas pouco apelativas para os consumidores e investigadores. Estima-se que nos Estados Unidos sejam produzidos 80 milhões de toneladas de finos com dimensões inferiores a 0,075mm, tornando-se imperativo realizar estudos sobre o comportamento deste material quando aplicado no betão. Os resultados possivelmente irão permitir encontrar uma aplicação para este tipo de agregados.

2.11. POSSÍVEIS DE APLICAÇÕES DOS AGREGADOS PROVENIENTES DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Nos dias de hoje são diversas as aplicações que se podem dar aos agregados reciclados provenientes de CDW. Estes podem substituir a utilização de agregados naturais na grande maioria dos casos, excetuando as aplicações em betão armado em zonas de ambientes agressivos e em betão pré-esforçado, ou seja, casos onde as exigências são elevadas (Silva, 2008). A aplicação deste material pode ocorrer em aterros, sistemas de drenagem, bases e sub-bases de estradas, entre outras.

Em seguida apresentam-se alguns exemplos de possíveis aplicações de agregados reciclados.

2.11.1. APLICAÇÃO EM ESTRADAS

Segundo Jiménez, uma alternativa aos NA na construção de estradas são os RA de CDW, onde as propriedades mecânicas e físico-químicas do material substituto dependem principalmente da origem dos resíduos, da técnica de demolição e do processamento na central de reciclagem

Em Portugal, os agregados reciclados são utilizados como agregados para pavimentação em sub-bases e bases de estradas, existindo como documento regulador a especificação do LNEC E-473. Contudo este material também pode ser aplicado em taludes de escavação e aterro que necessitem de contenção. Por exemplo, os RA podem preencher os cestos de gabiões, porém, existem algumas exigências que constam no caderno de encargos do Instituto de Estradas de Portugal, relativamente às características do material granular que irá encher os mesmos. Os requisitos gerais impostos ao material são os seguintes: duros, compactos, inatacáveis pela ação dos agentes atmosféricos, que as dimensões após qualquer processo de crivagem se situem entre 10 e 20 cm e que não hajam fragmentos lamelares. Outras características exigem que o material possua um peso volúmico superior a 22 kN/m³ e que a resistência à carga pontual, após molhagem seja superior a 3,5 MPa (Silva, 2008).

2.11.2. APLICAÇÕES EM EDIFÍCIOS

Os edifícios com caves necessitam de um sistema para concretizar a drenagem inferior do pavimento enterrado e de drenos periféricos para evacuação das águas pluviais e/ou freáticas acumuladas. Uma das soluções correntes preconizada consiste na criação de drenos através do envolvimento de tubos perfurados com agregados grossos, envoltos com feltro geotêxtil. O agregado aplicado tem a função de permitir a percolação da água e não está sujeito a qualquer regulamento. Outra função desempenhada por agregados grossos nas obras de construção de edifícios, é a de enchimento quer de fundações, quer de qualquer outro elemento que seja necessário. Visto que, com a peneiração dos agregados reciclados fragmentados obtém-se as granulometrias desejadas, sugere-se a substituição dos agregados naturais utilizados em edifícios com funções de enchimento e de drenagem (Silva, 2008).

2.11.3. APLICAÇÕES EM AGREGADOS PARA BETÃO

Existem várias aplicações em que se pretende construir elementos em betão com uma dada forma específica, mas sem grandes necessidades de resistência, ou seja, a resistência é um requisito adicional desde que o local não esteja sujeito a ambientes agressivos. Neste caso, um betão produzido com agregados reciclados pode substituir os betões convencionais (Silva, 2008).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AmbienteOnline. 2008. “Ambiente Online - Decreto-Lei Dos RCD Entra Em Vigor Em Junho.” <http://www.ambienteonline.pt/canal/detalhe/6305> (May 12, 2015).
- Apambiente. 2015. “Resíduos.” <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84> (May 18, 2015).
- Associação Portuguesa do Ambiente. “RP Resíduos | Legislação | RCD | Entulho | Lagoa E Portimão, Algarve - RP Resíduos | Tratamento E Valorização de Resíduos de Construção E Demolição (RCD Ou Entulho) Em Estômbar, Lagoa, Algarve Reflexo Do Progresso Resíduos Lda.” <http://www.rpresiduos.com/legislaccedilatildeo.html> (May 24, 2015).
- Bravo, Miguel, Jorge Brito, Jorge Pontes, and Luís Evangelista. 2015. “Mechanical Performance of Concrete Made with Aggregates from Construction and Demolition Waste Recycling Plants.” *Journal of Cleaner Production* 99: 59–74. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652615002292>.

- Brito, Jorge. 2004. “DESCONSTRUÇÃO - UMA VISÃO POSSÍVEL DO FUTURO DA CONSTRUÇÃO.” In *REPENSAR A CONSTRUÇÃO VOL.1*,.
- Brito, Jorge, and Raul Gomes. 2001. “Reciclagem E Reutilização de Subprodutos Da Demolição Pelo Uso Controlado de Explosivos.” In *Construção 2001 - Congresso Nacional de Construção*, , 871–78.
- Ccdr. 2011. “Resíduos de Construção E Demolição.” https://www.ccdrc.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=1793:legislacao&catid=663:residuos-de-construcao-e-demolicao&Itemid=281&lang=pt (May 18, 2015).
- CCDRC. 2011. “Legislação.” https://www.ccdrc.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=1793%3Alegislacao&catid=663%3Aresiduos-de-construcao-e-demolicao&Itemid=281&lang=pt (May 12, 2015).
- Coelho, André, and Jorge Brito. 2012. “Economic Viability Analysis of a Construction and Demolition Waste Recycling Plant in Portugal - Part I: Location, Materials, Technology and Economic Analysis.” *Journal of Cleaner Production* 39: 338–52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.024>.
- Department of Design and Construction. 2003. *Demolition Waste Manual*.
- DIÁRIO DA REPÚBLICA. 2002. “Decreto-Lei N.º 152/2002 de 23 de Maio.” : 4680–99.
- Diário da república. 2008. “Portaria N.º 417/2008 de 11 de Junho.” : 3403–5.
- European Commission. 2011. “SERVICE CONTRACT ON MANAGEMENT OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE -.” 33(0).
- Freire, Luís, and Jorge Brito. 2001. “Custos E Benefícios Da Deomolição Seletiva.” In *Construção 2001 - Congresso Nacional de Construção*, , 863–70.
- Gonçalves, A., and Jorge Brito. 2001. “Viabilidade Económica Da Reciclagem de Agregados de Betão Demolido Para Fabico de Novo Betão.” In *Construção 2001 - Congresso Nacional de Construção*,.
- Gonçalves, Arlindo et al. 2015. “Guia Para a Utilização de Materiais Reciclados. Contribuição Das Novas Especificações LNEC.” In *2º Congresso Construção Sustentável*,.
- Gonçalves, Arlindo, and Rui D. Neves. 2003. “Agregados Reciclados 2.” In *Seminário Sobre Agregados*,.
- HIETE, M. 2013. “Waste Management Plants and Technology for Recycling Construction and Demolition (C&D) Waste: State- of-the- Art and Future Challenges.” In *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*,.
- JIMÉNEZ, J. R. 2013. “Recycled Aggregates (RAs) for Roads.” In *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*,.

- Levy, Salomon, and Paulo Helene. 2001. “Penetração de Íons Cl Em Concretos Com Agregados Convencionais E Agregados Reciclados.” In *Construção 2001 - Congresso Nacional de Construção*, , 887–94.
- LLATAS, C. 2013. “Methods for Estimating Construction and Demolition (C&D) Waste.” In *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*,.
- LNEC. 2006. *E 471 – 2006: Guia Para a Utilização de Agregados Reciclados Grossos Em Betões de Ligantes Hidráulicos*.
- M.H. Ozkul, and A. Baskoca. 1997. “Influence of Prolonged Agitation on Water Movement Related Properties of Water Reduce and Retarder Admixed Concretes.” *Elsevier Science* 27(5): 721–32.
- Matias, Daniel, and Jorge Brito. 2004. “Incorporação de Adjuvantes Em Betões Produzidos Com Agregados Grossos Reciclados de Betão.” In *REPENSAR A CONSTRUÇÃO VOL.1*, , 339–44.
- Matos, Ana Mafalda. 2010. *Estudo de Argamassas Com Substituição Parcial de Cimento Por Resíduos de Vidro Moídos*.
- De Melo, Aluísio Braz, Arlindo F. Gonçalves, and Isabel M. Martins. 2011. “Construction and Demolition Waste Generation and Management in Lisbon (Portugal).” *Resources, Conservation and Recycling* 55(12): 1252–64.
- Ministério Do Ambiente, Do Ordenamento Do Território E Do Desenvolvimento Regional. 2006. “Decreto-Lei N.º 178/2006 de 5 de Setembro.” : 6526–45.
- Ministério Do Ambiente, Do Ordenamento Do Território E Do Desenvolvimento Regional. 2008. “Decreto-Lei N.º 46/2008 de 12 de Março.”
- Ministérios Da Administração Interna, Do Equipamento, Do Planeamento Da Administração Do Território, Da Saúde E Do Ambiente. 1997. “Portaria N.º 335/97 de 16 de Maio Considerando.” : 2440–41.
- Ministérios Da Economia, Da Agricultura, Desenvolvimento Rural E Pecuária, Da Saúde E Das Cidades, Ordenamento Do Território E Ambiente. 2003. “Portaria N.º 209/2004 de 3 de Março.” : 1861–65.
- Pacheco-Torgal, F. et al. 2013. “Conventional Demolition versus Deconstruction Techniques in Managing Construction and Demolition Waste (CDW).” In *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*, , 139–83.
- Pereira, A., and Jorge Brito. 2001. “Utilização de Inertes Cerâmicos Reciclados Em Argamassas E Betões.” *Construção 2001 - Congresso Nacional de Construção* 895-902.
- Pichtel, John. 2003. “Construction and Demolition Debris.” In *Waste Management Practices: Municipal, Hazardous, and Industrial*, , 577–89.
- Santos, José, Fernando Branco, Jorge Brito, and Nuno Almeida. 2004. “Betão Com Agregados Grossos Reciclados de Betão: Resistência À Compressão E módulo de Elasticidade.” In *REPENSAR A CONSTRUÇÃO VOL.1*, , 357–62.

- Silva, J., and Lilibeth Salinas. 2001. "A Problemática Da Gestão de Resíduos Da Construção Em Portugal Numa Perspectiva Europeia." In *Construção 2001 - Congresso Nacional de ConStrução*, , 911–18.
- Silva, Lara. 2008. "Possibilidades De Utilização De Agregados De Resíduos De Construção E Demolição Na Construção De Edifícios Correntes." : 1–68.
- Silva, Pedro. 2008. *REUTILIZAÇÃO DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS NA CONSTRUÇÃO*.
- Silva, R. V., J. Brito, and R. K. Dhir. 2014. "Properties and Composition of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste Suitable for Concrete Production." *Construction and Building Materials* 65: 201–17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>.
- Spies, Sandra. 2009. "3R in Construction and Demolition Waste (CDW) – Potentials and Constraints." *GTZ – German Technical Cooperation Division for Environment, Resource Efficiency and Waste Management*: 1–22.
- Tessaro, Alessandra Buss, Jocelito Saccol de Sá, and Lucas Bastianello Scremin. 2012. "Quantificação E Classificação Dos Resíduos Procedentes Da Construção Civil E Demolição No Município de Pelotas, RS." *Ambiente Construído* 12(2): 121–30.
http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212012000200008&lng=en&nrm=iso&tlng=pt (May 24, 2015).
- Zhao, W., R. B. Leeftink, and V. S. Rotter. 2010. "Evaluation of the Economic Feasibility for the Recycling of Construction and Demolition Waste in China-The Case of Chongqing." *Resources, ConservaTion and Recycling*: 377–89.

3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUÇÃO

Para investigar as potencialidades da utilização do CDW como substituto parcial do cimento, elaborou-se o programa experimental descrito no presente capítulo, que consistiu na comparação entre provetes com 100 % de cimento e provetes com substituição do cimento por 5 % e 10% de CDW.

No presente programa, apenas foram considerados os finos resultantes do processo de reciclagem dos resíduos de construção e demolição, o material em geral rejeitado para reaplicação. Estes finos foram preparados mecanicamente em laboratório e transformados em pó com finura inferior ao cimento utilizado, como detalhado no ponto 3.2.2.2.

O programa experimental englobou três fases:

1. Ensaios com a amostra de CDW;
2. Ensaios com pasta com CDW;
3. Ensaios com argamassa com CDW.

No que refere aos ensaios com amostra de CDW determinou-se inicialmente a quantidade de matéria orgânica na amostra de CDW através do ensaio da determinação de húmus segundo a EN 1744-1.

Seguiu-se a moagem do CDW do qual resultou um material com uma finura inferior ao cimento utilizado e, designado por CDWf. Os seguintes ensaios foram então realizados no CDWf:

- ✓ Determinação da massa volúmica (E-64);
- ✓ Microscopia Eletrónica de Varrimento.

Relativamente aos ensaios com pasta os constituintes utilizados foram:

- Cimento CEM I 42,5 R (cedido pela SECIL);
- Água destilada;
- Resíduos de construção e demolição moídos, CDWf.

Os ensaios realizados com a pasta foram os seguintes:

- ✓ Expansibilidade (NP EN 196-3);
- ✓ Tempo de presa (NP EN 196-3);
- ✓ Consistência (NP EN 196-3);

No que concerne aos ensaios com argamassas utilizaram-se os seguintes constituintes:

- Cimento CEM I 42,5 R (cedido pela SECIL);
- Água destilada;
- Areia normalizada CEN;
- Finos de resíduos de construção e demolição moídos (CDWf);
- Fíler de carbonato de cálcio.

O estudo realizado sobre as argamassas comportou vários ensaios, nomeadamente:

- ✓ Avaliação da trabalhabilidade (ASTM C 109/90 e ASTM 230);
- ✓ Ensaio das resistências mecânicas à compressão e flexão (NP EN 196-1);
- ✓ Ensaio de determinação da resistência à carbonatação (E-391);
- ✓ Ensaio de absorção de água por capilaridade (com base na E-393);
- ✓ Ensaio de penetração de cloretos (E-463);
- ✓ Ensaio da reação álcali-sílica – ASR (ASTM C 1260-94).

3.2. MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1. CIMENTO

Para a realização de todos os ensaios anteriormente referidos optou-se por utilizar um cimento CEM I 42,5 R, um cimento indicado para este programa. Este cimento é constituído por 95% a 100% de clínquer, não contem outros constituintes principais sendo os restantes 0% a 5% constituintes adicionais minoritários.

Na figura seguinte está representada a distribuição granulométrica do cimento, realizada no granulómetro laser do LEMC:

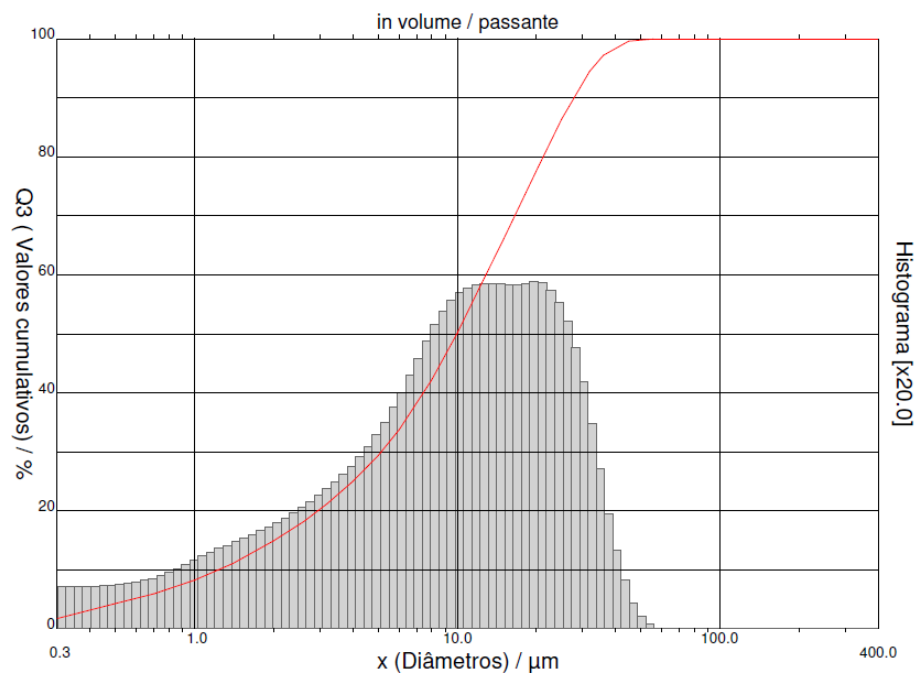


Figura 3. 1 - Curva granulometria do cimento obtida pelo granulômetro laser

3.2.2. FINOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO MOÍDOS

3.2.2.1 ORIGEM DA AMOSTRA

A amostra utilizada neste procedimento provém de uma empresa portuguesa, Resíduos de Construção e Demolição SA, localizada na Figueira da Foz, que recebe diversos resíduos de construção e demolição, impossibilitando assim a identificação da proveniência/origem da amostra.



Figura 3. 2 - Amostra de CDW

O processo de reciclagem dos resíduos de construção e demolição da empresa referida, é constituído pelas seguintes fases:

1. No ato de receção dos CDW existe uma pré-seleção do material, onde as peças de betão com qualidade e sem vestígios de terra vegetal são diretamente colocadas na britadeira originando agregado reciclado com as dimensões pretendidas pelo produtor;
2. O material que não foi pré-selecionado, é sujeito a um processo de reciclagem diferente. Onde primeiramente é separado em dois tipos de granulometria, 0/30mm e > 30mm.
3. Segue-se uma triagem mecânica, onde é retirado o metal, plástico, madeira, entre outros. Se necessário realiza-se uma triagem manual, que, como o próprio nome indica, nesta fase o material é recolhido manualmente, sendo este constituído por resíduos indesejáveis que não foram expulsos aquando da triagem mecânica.
4. Por fim o material é separado por diferentes granulometrias, resultando num agregado britado com diferentes dimensões. Os CDW produzidos têm portanto as seguintes possíveis dimensões:



0-10 mm



10-30 mm;



30 – 80 mm;



> 80 mm.

Figura 3. 3 - Granulometrias obtidas durante o processo de reciclagem dos CDW (RCD)

Todas as granulometrias atrás enunciadas e o material recolhido na triagem mecânica são valorizados, mas nem todo o material resultante do processo de reciclagem é apropriado para venda, sendo o destino final da parte rejeitada, o aterro.

Para o presente programa experimental a amostra recolhida, aquando da visita à empresa, corresponde ao material mais fino (0-10mm) resultante do processo de reciclagem dos CDW. Por norma este material fino resultante do processamento não é muito aceite no mercado por diversas razões, tais como, o facto de absorverem muita água quando utilizados no fabrico de betão e portanto, limitarem a sua qualidade. Também é um material propício a conter na sua composição materiais perigosos que comprometem futuras aplicações, tornando-se necessário encontrar uma aplicação inovadora.

3.2.2.2. DETERMINAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA

A matéria orgânica consiste numa impureza nos agregados e provém de tecidos vegetais e animais, sob a forma de partículas de húmus e argila orgânica. A presença deste material em grandes quantidades, afeta de uma forma nociva as propriedades do betão (André, 2013).

As impurezas deste tipo influenciam as reações químicas de hidratação do cimento durante o período de presa provocando um retardamento do mesmo, que induz uma diminuição da durabilidade e da resistência do betão, sendo por isso necessário detetar a presença de matéria orgânica e verificar se a quantidade é admissível. Para além dos danos negativos que este material provoca no betão, as impurezas também provocam danos nas armaduras (André, 2013).

A presença de matéria orgânica é mais frequente em agregados finos.

Como nem todas as impurezas orgânicas são prejudiciais, é essencial determinar a quantidade de matéria orgânica presente na amostra. A norma EN 12620 refere que a determinação deste tipo de impurezas deve ser determinada de acordo com a secção 15 da norma EN 1744-1. Esta secção descreve o procedimento para determinação do teor de húmus, sendo o húmus uma substância orgânica que se forma no solo pela decomposição de restos de animais e/ou plantas. A determinação desta impureza é possível visto que, o húmus desenvolve uma cor escura ao reagir com o hidróxido de sódio (NaOH), onde a intensidade da cor varia de acordo com a quantidade de húmus detetada na amostra.

Inicialmente colocou-se a amostra de CDW na estufa a $(40 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ até massa constante. Seguiu-se a peneiração do material no peneiro 4mm, onde todo o material retido neste peneiro foi eliminado. Uma parte do material que passou no peneiro foi colocado num balão de vidro, contendo solução de NaOH com uma altura de 80 mm, até a solução atingir 120mm. Posteriormente agitou-se o balão para eliminar possíveis bolhas de ar. Após 24 horas da colocação do material, comparou-se a cor da solução com a cor da solução padrão.



Figura 3. 4 - Peneiração da amostra de CDW no peneiro 4mm

3.2.2.3. AFINAÇÃO DA MOAGEM DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Para que o CDWf (em estudo) possa ser considerado um substituto parcial do cimento, convém que a finura seja semelhante ou inferior à finura do cimento escolhido. Assim foi necessário moer a amostra no moinho de bolas, para reduzir a granulometria. Para que a amostra colocada no moinho fosse o mais representativa possível, realizou-se o esquartelamento de todo o produto recolhido na empresa. O esquartelamento executou-se segundo a norma NP EN 932-2.



Figura 3. 5 - Esquartelamento da amostra

Devido à elevada humidade presente na amostra resultante do esquartelamento, procedeu-se à secagem do material, a uma temperatura de 110°C até massa constante.

De seguida, colocou-se a amostra seca com o peso de 1278,3g no moinho de bolas, tendo-se a preocupação que o peso das bolas fosse superior ao da amostra. Seguiu-se a moagem do material.





Figura 3. 6- Fases de moagem no moinho de bolas

Como não se conhecia o tempo necessário de moagem retiraram-se amostras às 8h, 13h, 24h e 48h durante o processo de moagem. Estas posteriormente foram analisadas no granulômetro laser, permitindo ter um conhecimento da evolução da finura com o tempo de moagem. Nas figuras 3.7 e 3.87 comparam-se as curvas granulométricas do cimento e o CDW moído para os tempos acima referidos.

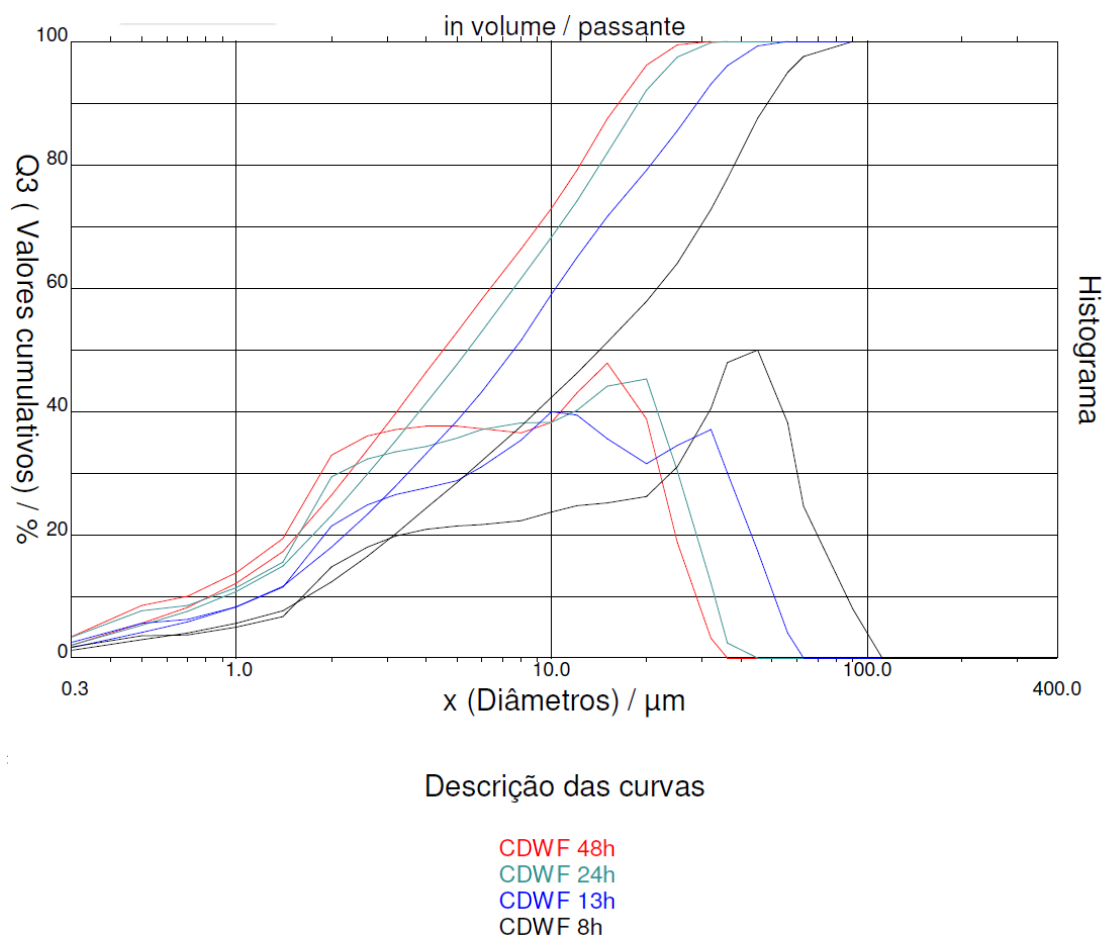


Figura 3. 7 - Curva granulométrica laser do CDWf com 8h,13h,24h e 48h de moagem

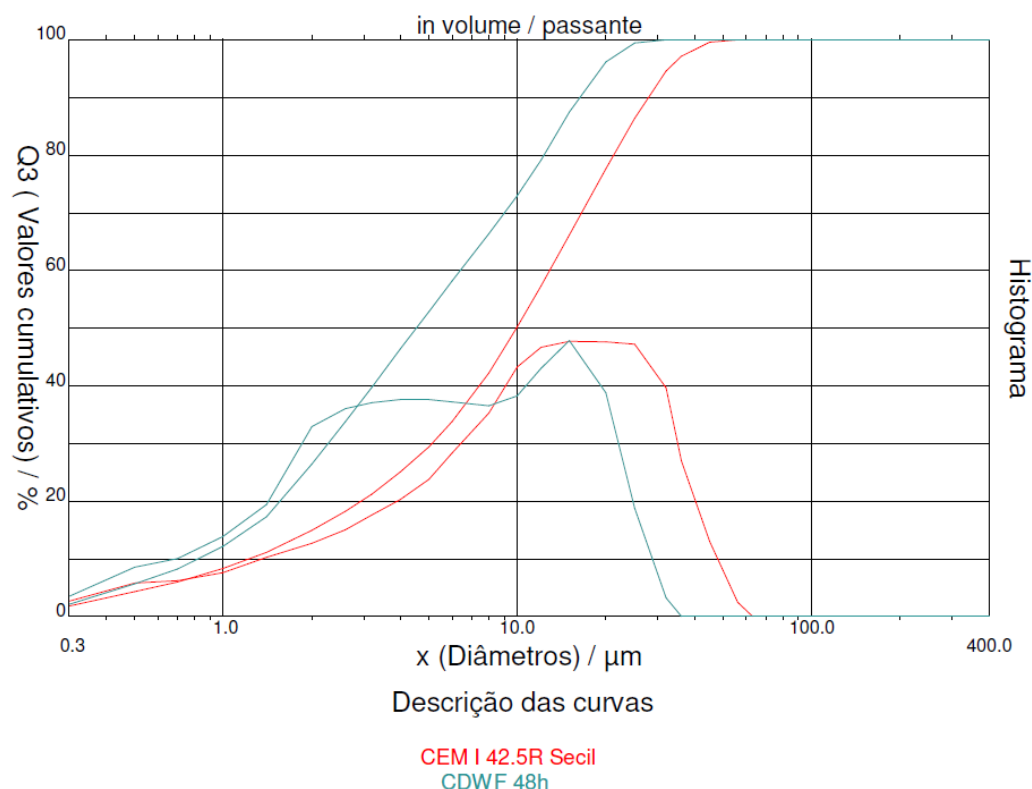


Figura 3. 8 - Curva granulométrica laser do cimento e do CDWF moído 48h

Tabela 3. 1 - Dimensões do cimento e do CDW com 13h, 24h e 48h de moagem

Amostra	d(10)	d(50)	d(90)	D médio
Cimento	1.22 μm	9.94 μm	27.95 μm	12.57 μm
CDW moído 8h	1.67 μm	14.22 μm	48.40 μm	20,68 μm
CDW moído 13h	1.18 μm	7.58 μm	28.95 μm	11.55 μm
CDW moído 24h	0.92 μm	5.43 μm	18.87 μm	7.99 μm
CDW moído 48h	0.82 μm	4.54 μm	16.34 μm	6.85 μm

Pela visualização dos gráficos e da tabela conclui-se que 8h e 13h de moagem não foram suficientes para atingir a finura pretendida, mas com 24h o CDW obteve uma curva com menor granulometria comparando com o cimento. Contudo a moagem continuou até às 48h porque quanto mais fino for o material substituto provavelmente melhores serão os resultados das propriedades em estudo.

Depois do material ter sido moído 48h, efetuou-se uma peneiração devido à presença de raros grãos grossos (ver Figura 3.9) e rejeitou-se todo o material que não passava no peneiro 0,063 mm, cerca de 9,8g de partículas (todas com dimensões superiores a 1mm). Como a massa rejeitada foi inferior a 1% da massa total da amostra (segundo a NP EN 933-1) colocada no moinho, pode-se considerar que é uma quantidade desprezável.



Figura 3. 9 - Massa de CDW rejeitada

3.2.2.4 MICROSCOPIA ELETRÓNICA DE VARRIMENTO (MEV) EM PARTÍCULAS DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO MOÍDAS

O microscópio eletrónico de varrimento é utilizado para uma análise micro estrutural de um material sólido, permitindo ampliações muito superiores ao microscópio ótico.

O MEV possibilita:

- ✓ Uma elevada precisão e resolução espacial do material em estudo;
- ✓ Uma análise química a nível local;
- ✓ Determinar a orientação e estrutura dos constituintes cristalinos.

Os resultados provenientes da utilização do MEV, encontram-se na Figura 3.10 e Figura 3.11.

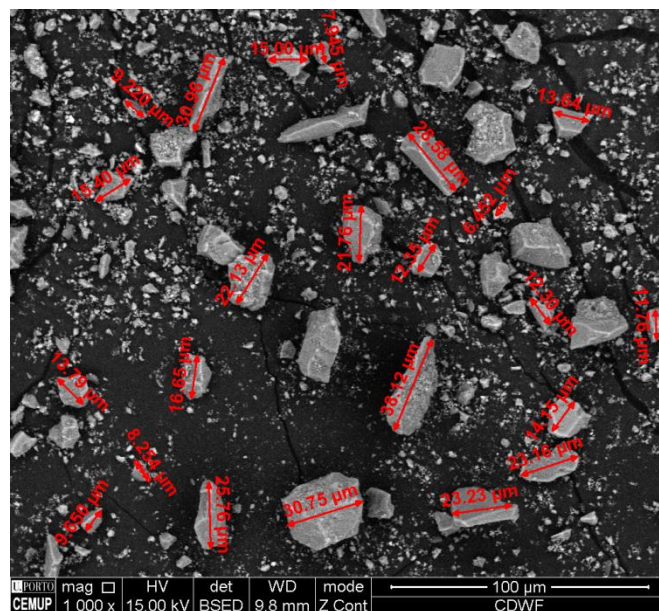


Figura 3. 10 – Partículas de CDWf moídas, observadas em MEV

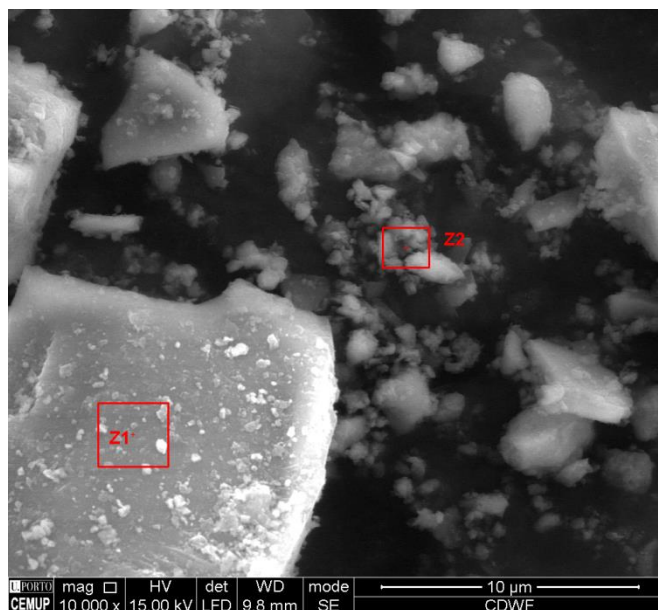


Figura 3. 11 – Partícula de maior dimensão (Z1) e de menor dimensão (Z2) sinalizadas na imagem recolhida no MEV

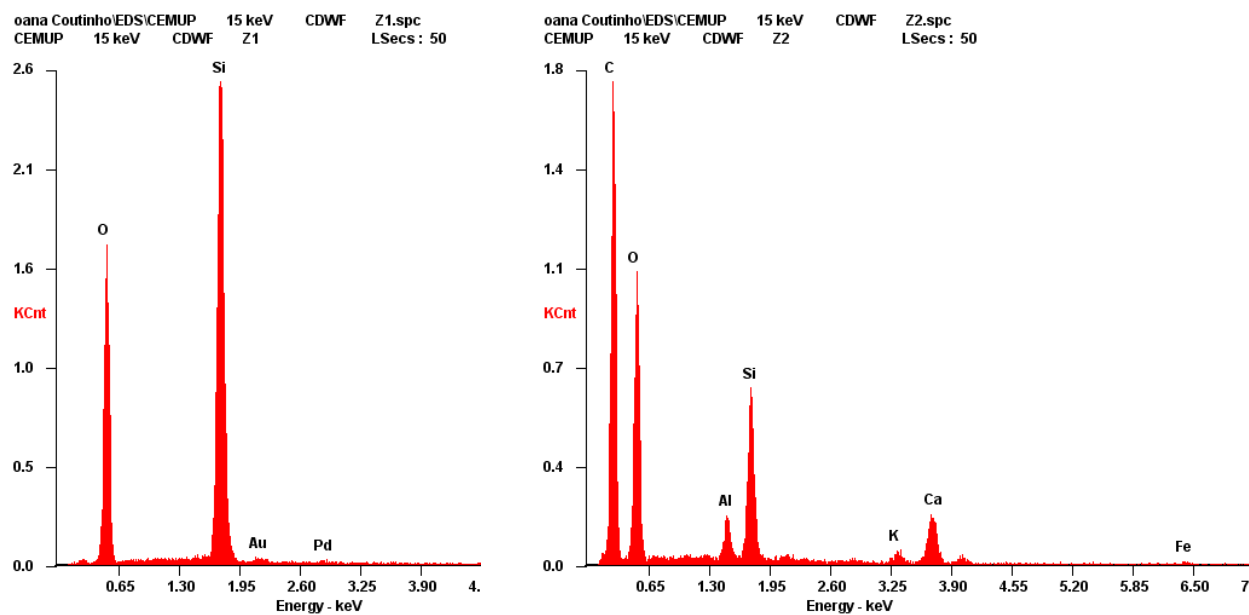


Figura 3. 12 - Espectro da Zona Z1 (esq.) e Z2 (dir.)

A partir da visualização e da análise dos espectros da Figura 3. 12, verifica-se que a zona Z1, correspondente a um grão mais grosseiro é composta por sílica e a zona Z2, correspondente a um grão mais pequeno será provavelmente de pasta de cimento hidratada.

3.2.3. AREIA NORMALIZADA CEN

Segundo a norma NP EN 196-1, a areia normalizada CEN deve cumprir a granulometria indicada na Tabela 3.2. Esta é uma areia natural, siliciosa com grãos arredondados e o seu teor em sílica não é inferior a 98%.

Tabela 3. 2 - Composição granulométrica da areia referência retirada da NP EN 196-1

Abertura dos peneiros (mm)	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Resíduos acumulados (%)	0	7 ± 5	33±5	67±5	87±5	99±1

3.2.5. ÁGUA

A norma NP EN 196-1 para os ensaios de referência aconselha o uso de água destilada ou desionizada e para os restantes ensaios água potável. Neste procedimento experimental utilizou-se água destilada em todos os ensaios. A água utilizada encontrava-se à temperatura ambiente do laboratório onde se realizaram as amassaduras ($20\pm 2^{\circ}\text{C}$).

3.2.6 FÍLER CARBONATO DE CÁLCIO

O fíler resulta da moagem do material que contem na sua composição carbonato de cálcio. O material utilizado provem de uma empresa portuguesa localizada em Soure. A ficha técnica do material encontra-se em anexo.

O fíler de carbonato de calcário utilizado é quimicamente inerte. O fíler foi usado apenas nos ensaios de ASR como substituto parcial do cimento

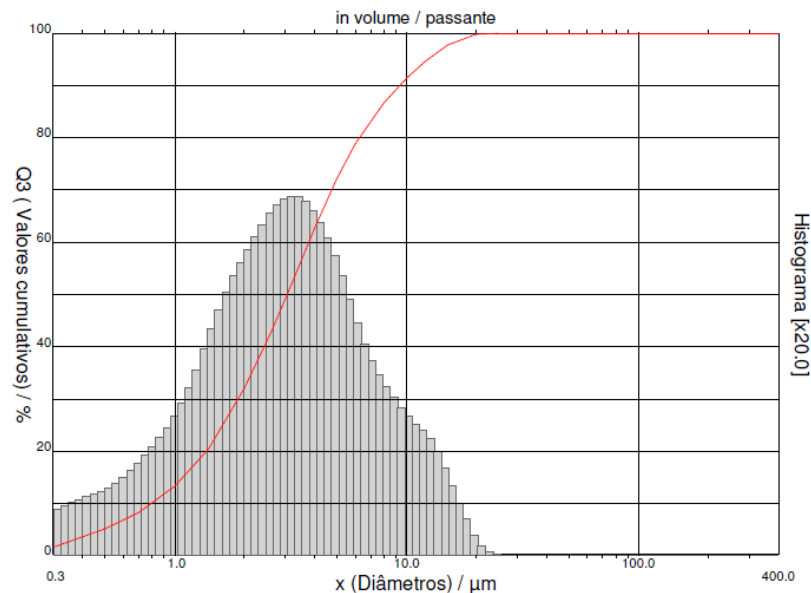


Figura 3. 13 - Curva granulométrica laser do fíler de carbonato de cálcio

Este material contém uma granulometria semelhante à dos finos de CDW moídos 48h.

Tabela 3. 3 - Comparação das dimensões entre o material moído 48h e o filer

Material	d(10)	d(50)	d(90)	D médio
CDW moído 48h	0.82 μm	4.54 μm	16.34 μm	6.85 μm
Fíler de carbonato de cálcio	0.79 μm	3.05 μm	9.38 μm	4.22 μm

3.3. ENSAIOS

3.3.1. COMPOSIÇÃO E FABRICO DOS PROVETES

Como descrito no início deste capítulo produziram-se materiais distintos para preencher os moldes dos respetivos ensaios.

Na grande maioria dos ensaios utilizou-se argamassa excetuando os ensaios da expansibilidade, do tempo de presa e da consistência, onde o material utilizado foi pasta normalizada.

A argamassa é constituída por uma parte de cimento, três partes de areia normalizada CEN e meia parte de água, em massa. Para o fabrico de três provetes, a norma NP EN 196-1 indica que cada amassadura deve conter $(450 \pm 2)\text{g}$ de cimento, $(1350 \pm 5)\text{g}$ de areia e $(225 \pm 1)\text{g}$ de água, estas quantidades são referentes à argamassa de controlo (CTL). Relativamente às restantes argamassas efetuou-se uma substituição parcial de cimento por 5% de CDWf (CDWf5) e 10% de CDWf (CDWf10) mantendo-se as quantidades de areia e de água iguais às da argamassa de controlo.

As quantidades dos constituintes das argamassas foram as seguintes:

Tabela 3. 4 - Quantidades para cada argamassa

Proвете	Água (g)	Cimento (g)	FCDW(g)	Água/ligante	Areia(g)
CTL	225,0	450,0	0,0	0,50	1350,0
CDWf5	225,0	427,5	22,5	0,50	1350,0
CDWf10	225,0	405,0	45,0	0,50	1350,0

Para a amassadura da argamassa cumpriu-se o procedimento descrito na norma NP EN 196-1:

- Juntou-se a água e o ligante (cimento, filer ou CDW);
- Colocou-se o misturador em funcionamento durante 30s a velocidade lenta;
- Seguindo-se a introdução areia durante 30s, mantendo a mesma velocidade;
- Procedendo-se 30s com velocidade rápida;
- Parou-se a misturadora durante 90s e durante os primeiros 30s mexeu-se a argamassa com uma espátula;
- Continuou-se durante 60s a uma velocidade rápida;

- Na produção da argamassa garantiu-se as condições do laboratório, da misturadora, dos moldes e do compactador exigido na norma;

Seguiu-se a compactação da argamassa nos moldes. Como as dimensões variam conforme as exigências do ensaio, implica que os métodos de compactação sejam adaptados a cada tipo de molde.

Para os ensaios de resistências mecânicas, a argamassa foi compactada num compactador, onde encheu-se até meio o molde previamente oleado, sendo submetido a 60 pancadas em $(60 \pm 3)s$ e coloca-se por fim, uma segunda camada até o molde ficar preenchido, repetindo-se novamente a compactação.



Figura 3. 14 - Compactador

Nos ensaios de penetração de cloretos e absorção por capilaridade, os moldes foram diferentes dos utilizados nos ensaios de resistências mecânicas. Para o preenchimento total do molde foram necessárias duas amassaduras, produzidas no máximo com 10 minutos de diferença. A primeira argamassa ficou tapada com um pano bastante húmido enquanto a segunda era produzida. No fim, as duas foram misturadas na misturadora a uma velocidade lenta durante 30s.

A compactação ocorreu na mesa vibratória durante 30s, tempo necessário para que a argamassa deixasse de expelir as bolhas de ar retidas na mistura.



Figura 3. 15 - Enchimento dos moldes na mesa vibratória

Para os moldes do ensaio de ASR compactou-se manualmente.



Figura 3. 16 - Compactação manual dos provetes de ASR

Depois de moldados, os provetes foram descofrados (24 ± 2)h depois do início da amassadura e foram devidamente identificados. Após a desmoldagem os provetes ficaram submersos em água a $(20,0 \pm 1,0)^\circ\text{C}$ até a data do ensaio.

No que se refere às pastas, seguiu-se a norma NP EN 196-3. A pasta de controlo é composta por 500g de cimento e a quantidade de água determinou-se a partir da consistência, que será analisada mais a frente neste capítulo. Tendo resultado nas seguintes composições:

Tabela 3. 5 - Composição das pastas

Proвете	Água (g)	Cimento (g)	FCDW(g)
CTL	142,0	500,0	0,0
CDWf5	144,0	475,0	25,0
CDWf10	147,0	450,0	50,0

O procedimento para o fabrico da pasta foi o seguinte:

- Juntou-se a água e o ligante (cimento, fíler ou CDWf);
- Colocou-se o misturador em funcionamento durante 90s a velocidade lenta;
- Parou-se a misturadora durante 30s e raspou-se a argamassa com uma espátula;
- Continuou-se a misturar durante 90s a uma velocidade lenta.

A pasta não sofreu compactação nem vibração. Para a eliminação de possíveis vazios bateu-se suavemente no topo do molde preenchido totalmente com pasta.

3.3.2. TRABALHABILIDADE

Segundo ASTM (American Society for Testing and Materials), a trabalhabilidade é uma propriedade que permite identificar o esforço necessário para manipular uma quantidade de betão fresco com uma perda mínima de homogeneidade (civilblog, 2014).

Em Portugal, a definição de trabalhabilidade consiste na maior ou menor facilidade de execução do betão (transporte, colocação, adensamento, acabamento) e a menor ou maior facilidade de segregação durante essas operações.

Vários são os fatores que alteram a trabalhabilidade do betão que podem ser fatores externos (como, a mistura, transporte; lançamento, entre outros) ou fatores internos (como consistência, granulometria do betão, forma do grão do agregado, adjuvantes).

Não existe um método exato para medir a trabalhabilidade e uma das soluções encontradas é medir algumas características relacionadas com a trabalhabilidade (Coutinho, 2003).

A mesa de espalhamento (descrita na ASTM C230/C230M), permite determinar a consistência da argamassa. O ensaio consistiu em encher com argamassa até meio um molde tronco-cónico normalizado, compactando-se com 20 pancadas, seguindo-se o enchimento total, repetindo-se o número de pancadas.

Após a remoção do molde, ocorreu a compactação do bolo de argamassa fazendo-se levantar e cair a mesa de espalhamento 25 vezes durante 15s.

A trabalhabilidade é definida pelo espalhamento da argamassa, que corresponde à média das quatro medições do diâmetro da argamassa ao longo das 4 linhas marcadas na mesa (ver Figura 3. 17).

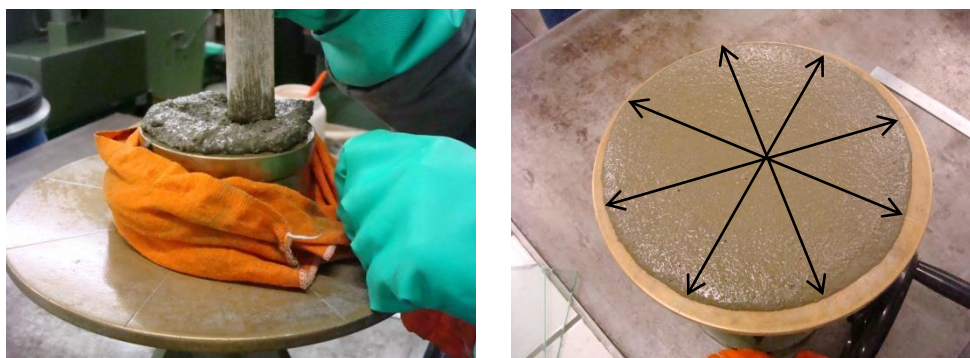


Figura 3. 17 - Argamassa no molde tronco-cónico (esq.) e espalhamento da argamassa após sofrer 25 pancadas (dir.)

Como a finura do material é bastante menor que o cimento, as partículas de CDW poderão ser mais suscetíveis à absorção de água do que as partículas de cimento, podendo alterar determinadas propriedades das argamassas com substituto. De modo, a verificar se a trabalhabilidade das argamassas de CDWf5 e CDWf10 era da mesma ordem de grandeza da trabalhabilidade de controlo, começou-se por determinar o espalhamento médio da argamassa de controlo e considerou-se este valor como o espalhamento padrão. Em seguida, determinou-se o espalhamento das argamassas com substituto parcial de cimento e verificou-se que estavam dentro do intervalo admissível $[233 \pm 10 \text{ mm}]$, concluindo-se que as argamassas não necessitavam de superplastificante.

Para cada ensaio determinou-se o espalhamento da argamassa e no final calculou-se a média total dos valores de espalhamento obtidos de todas as amassaduras realizadas para cada composição.

Tabela 3. 6 - Valores da trabalhabilidade (em mm) recolhidos em todos os ensaios com utilização da argamassa

Ensaio	CTL	CDWF5	CDWF 10
Resistência 7 dias	235	235	237
Resistência 28 dias	231	236	236
Resistência 90 dias	236	236	238
Resistência 180 dias	235	236	233
Resistência à Carbonatação	235	234	236
Penetração de cloretos	233	232	236
Absorção por capilaridade	234	238	239
ASR	229	236	226
Média total	233	235	235
Desvio padrão	2,40	1,63	4,05

3.3.3 MASSA VOLÚMICA

A massa volúmica permite calcular a composição de um betão, determinar a superfície específica de um cimento e verificar se o cimento CEM I está parcialmente hidratado (Coutinho, 2002). De facto para o CEM I um valor de massa volúmica inferior a $3,05 \text{ g/cm}^3$ indica que o cimento está mal cozido, adulterado ou parcialmente hidratado.

Esta grandeza é determinada conhecendo a massa e medindo o seu volume a partir do deslocamento de um líquido num voluminimetro apropriado, designado incorretamente por “densímetro” de Le Châtelier (Coutinho, 2002).

Para a execução do ensaio de determinação da massa volúmica do cimento, dos CDWf e do fíler seguiu-se a especificação do LNEC E64.

Inicialmente colocou-se o cimento, os CDWf moídos 48h e o fíler na estufa a uma temperatura de 105°C até massa constante. Após dessecação dos materiais, pesou-se 65 g de cimento e 50g de CDWf e de fíler. É importante referir que no caso das adições estas possuem uma menor massa volúmica, o que quer dizer que para a mesma quantidade, a capacidade de medição do voluminimetro estava ultrapassada, resultando numa quantidade de adição menor relativamente ao cimento.

Posteriormente, com o auxílio de funil introduziu-se o material, tendo-se o cuidado de evitar que o material ficasse aderente às paredes do voluminimetro acima do nível do líquido, que continha petróleo a uma temperatura de 20°C . Por fim, rodou-se o frasco para eliminar possíveis bolhas de ar e

deixou-se o recipiente em repouso para mais tarde se registrar o valor da escala correspondente ao nível do líquido.



Figura 3. 18 - Fases do ensaio de determinação de massa volúmica

No final do ensaio, procedeu-se ao cálculo da massa volúmica através da seguinte expressão:

$$\rho = \frac{m}{V_1 - V_2}$$

Sendo:

ρ - Massa volúmica do provete, em gramas por centímetro cúbico;

m - Massa do material seco, em gramas;

V1 - Leitura no voluminimetro contendo apenas o líquido auxiliar (petróleo), em centímetros cúbicos;

V2 - Leitura no voluminimetro contendo o líquido auxiliar e o provete, em centímetros cúbicos.

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.7.

Tabela 3. 7 – Resultados obtidos no ensaio de determinação de massa volúmica

Provete	Massa (g)	v1 (cm ³)	v2 (cm ³)	Massa volúmica (g/cm ³)
Cimento	65	0,7	21,6	3,1
CDWf	50	0,5	20	2,6
Filer	50	0,6	19,4	2,7

3.3.4. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA NORMAL E DO TEMPO DE PRESA

Para determinar os tempos de presa e a consistência, como já referido anteriormente no ponto 3.3.1., utilizou-se pasta normal, seguindo o procedimento descrito na norma NP EN 196-3.

A consistência normal de uma pasta tem uma resistência especificada quando sofre uma penetração de uma sonda normalizada. A resistência permite determinar a quantidade de água a colocar na pasta, sendo necessário fazer várias tentativas de penetração até que a distância entre a placa base e a sonda seja igual a (6 ± 2) mm.

Para a determinação da consistência utilizou-se o aparelho de Vicat munido com uma sonda. Colocou-se o molde e a placa de base no eixo da sonda do aparelho e baixou-se a sonda até entrar em contacto com a pasta. Para evitar uma velocidade inicial ou uma aceleração forçada, segurou-se a sonda durante 2 a 3 segundos na posição atrás referida, só depois se soltou-se rapidamente as partes móveis.

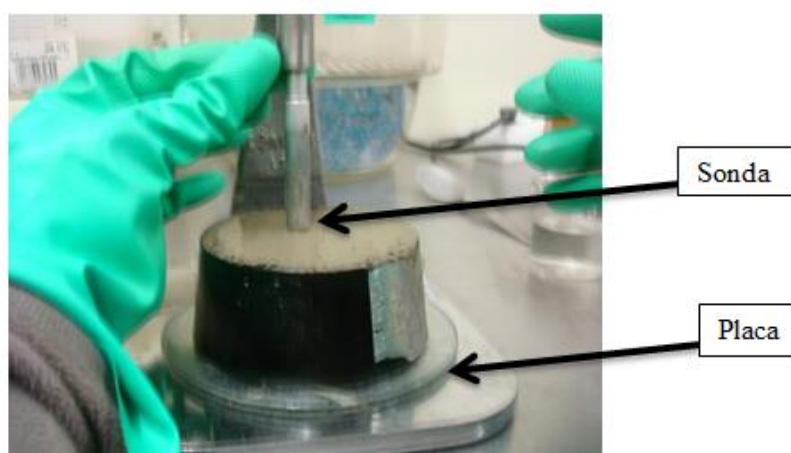


Figura 3. 19 - Início do ensaio para a determinação da consistência normal



Figura 3. 20 - Penetração da sonda na pasta

Em geral, 2 a 4 horas após a amassadura, a mistura começa a ganhar rigidez muito rapidamente e considera-se que atingiu o início de presa. No entanto, a resistência é ainda muito baixa e o endurecimento só começa após o fim de presa que ocorre umas horas depois. O endurecimento é, depois, muito rápido nos primeiros um ou dois dias e, posteriormente, a resistência continua a aumentar mas a uma taxa cada vez menor, durante semanas, meses e anos (Coutinho, 2002).

A norma NP EN 196-3 define que:

- ✓ Início de presa: é o tempo decorrido entre o instante zero (primeira picada) e o tempo ao fim do qual a distância entre a agulha e a placa é (6 ± 3) mm, ou seja, é o tempo entre a amassadura e a perda da plasticidade;
- ✓ Fim de presa: é o tempo a partir do instante zero ao fim do qual a agulha só penetra pela primeira vez até 0,5mm no provete, ou seja, é o tempo até a pasta ter ganho alguma resistência, conseguindo resistir a uma certa pressão.

Para a determinação do tempo de início e fim de presa colocou-se o molde utilizado no ensaio de determinação da consistência por baixo da agulha do aparelho de Vicat.



Figura 3. 21 - Provete de pasta durante (esq.) e após o ensaio (dir.) para a determinação do tempo de presa

Tabela 3. 8 - Resultados obtidos nos ensaios de determinação da Consistência normal e do Tempo de presa

Provete	Água (g)	A/C (%)	Consistência normal (mm)	Início de presa (a)	Fim de presa (b)	b-a
CTL	142	28	6	3h49	5h24	2h35
CDWf5	144	29	6	4h10	6h10	2h00
CDWf10	147	29	4	5h03	6h58	1h55

Pela análise da tabela anterior é notório que quanto maior for a percentagem de substituição do cimento pelo material em estudo, mais tarde ocorre a perda de plasticidade. Contudo, após o início de presa as pastas com adição atingem o fim de presa num menor intervalo de tempo do que a pasta de controlo.

3.3.5. EXPANSIBILIDADE

“A expansibilidade é determinada observando a expansão volúmica de uma pasta de cimento de consistência normal, indicada pelo deslocamento relativo de duas agulhas” (NP EN 196-3, 2009)

É importante que a pasta não sofra grandes variações de volume após a presa, se as mesmas forem impedidas, podem causar a destruição do material. As expansões podem ser causadas por hidratação lenta ou retardada de alguns compostos presentes na pasta normalizada como óxido de cálcio livre, sulfato de cálcio e óxido de magnésio (Coutinho, 2002).

Este ensaio permite detetar a expansibilidade devido a presença do óxido de cálcio livre.

O procedimento seguido encontra-se de acordo com a NP EN 196-3.

Com a pasta de Consistência normal utilizada no ensaio anterior, foram preenchidos os moldes (agulhas) de Le Châtelier. Estes são colocados num banho de água a $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ durante $24\text{h} \pm 30\text{min}$ e no fim deste período ocorre a medição do afastamento entre as extremidades das agulhas (A).



Figura 3. 22- Moldes colocados num banho de água antes da medição (A)

Posteriormente, os moldes foram aquecidos gradualmente até à ebulição da água durante (30 ± 5) min e manteve-se em ebulição durante $3h \pm 5$ min. No fim deste período realizou-se uma nova medição (B). Deixaram-se os moldes arrefecerem até a temperatura ambiente e executou-se a última medição (C).



Figura 3. 23 - Moldes colocados em água em ebulição antes da medição (B)

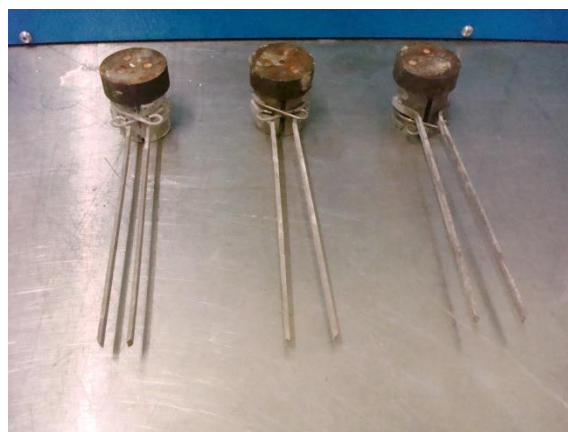


Figura 3. 24 - Arrefecimento dos moldes, ocorrendo posteriormente a medição C

O ensaio permite medir a expansibilidade, traduzindo-se na diferença entre as medições C e A. O resultado da expansibilidade é a média aritmética da diferença das medições dos três provetes.

Tabela 3. 9 - Resultados obtidos no ensaio da Expansibilidade (em mm)

Provete	A	B	C	A-C	Média	Desvio padrão
CTL (i)	24	25	26	2	2	0
CTL (ii)	22	23	24	2		
CTL (iii)	10	11	12	2		
CDWF5 (i)	10	11	11	1	1	0
CDWF5 (ii)	19	20	20	1		
CDWF5 (iii)	20	21	21	1		
CDWF10 (i)	11	12	12	1	1	0
CDWF10 (ii)	25	26	26	1		
CDWF10 (iii)	14	15	15	1		

As pastas com substituição parcial do cimento sofreram uma expansão menor do que a pasta de controlo.

3.3.6. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

O desenvolvimento das resistências no betão está diretamente relacionado com o grau de hidratação. (Kaszynska, 2004) Em que um aumento do grau de hidratação resulta no aumento da resistência (Lura, Durand, Loukili, Kovler, & Jensen, 2006).

Como a resistência depende também das condições da amassadura, preparação dos provetes, natureza do ensaio escolhido, entre outras, é necessário prescrever a maneira exata de ensaiar o cimento (Coutinho, 2002).

Para a determinação da resistência mecânica executou-se o procedimento descrito na norma NP EN 196-1. Neste ensaio foram cumpridos todos os requisitos relativos às argamassas, equipamentos e condições do laboratório exigidos pela mesma. A norma permite a determinação das resistências à compressão e à flexão.

Os provetes foram ensaiados aos 7 dias, 28 dias, 90 dias e 180 dias, sendo que o ensaio aos 180 dias não constará nos resultados deste trabalho, visto que a data do ensaio é posterior a data de entrega do mesmo. Contudo, realizou-se a moldagem do provete para estudos posteriores.

O material utilizado para preencher os moldes foi argamassa com a composição referida no ponto 3.3.1, como o exigido pela norma. Optou-se por moldar os provetes de controlo todos no mesmo dia, no dia seguinte os provetes com substituição de 5% e no terceiro dia os provetes com 10% de substituição. Os provetes foram desmoldados (24 ± 2)h depois da amassadura e ficaram submersos em água até ao dia do ensaio.

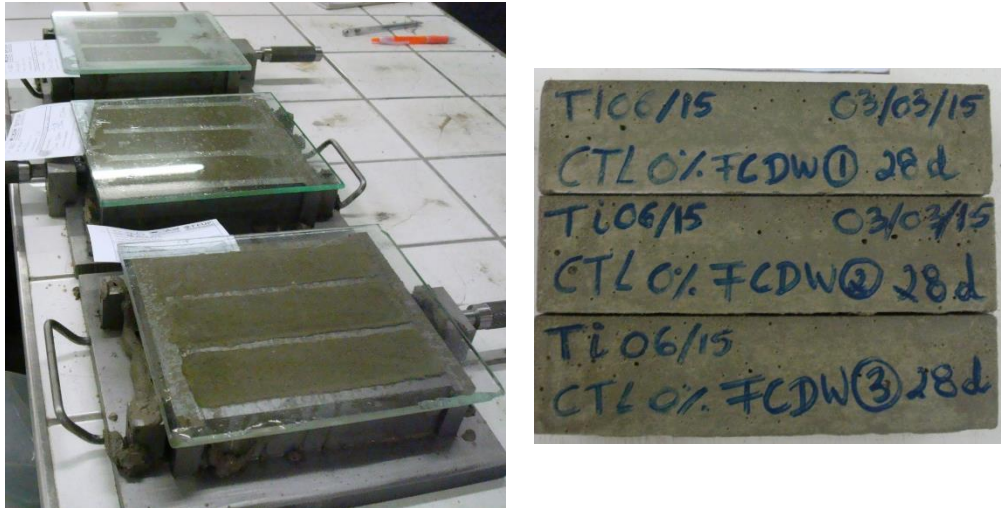


Figura 3. 25 - Provetes após enchimento (esq.) e desmoldagem (dir.)

Para a determinação das resistências à flexão moldaram-se provetes com forma prismática, com as dimensões 40x40x160 mm. O aparelho utilizado foi o equipamento de ensaio de determinação da resistência à flexão, onde foi aplicada uma carga no provete até a rotura, resultando em dois meios prismas que foram depois testados no ensaio de resistência à compressão.



Figura 3. 26 - Início (esq.) e fim do ensaio de determinação de resistência à flexão



Figura 3. 27 - Início (esq.) e fim (central) do ensaio de à compressão e efeito de cintagem (dir.)

O resultado da resistência à flexão é a média aritmética dos três resultados dos provetes. A resistência à compressão é a média de seis valores em que os resultados têm que constar no intervalo de $\pm 10\%$ da média. Caso um ou dois dos resultados, não pertençam ao intervalo, calcula-se a média aritmética de cinco ou quatro resultados, respetivamente. No caso de ser necessário excluir mais do que dois resultados, o ensaio terá que ser repetido.

Os resultados médios encontram-se nas tabelas 3.10 e 3.11, assim como, nos gráficos representados na Figura 3.28 e Figura 3.29 .

Tabela 3.10 – Resultados das resistências médias à flexão (em MPa) e os correspondentes desvios padrão

Proвете	7 d	Desvio padrão	28d	Desvio padrão	90d	Desvio padrão
CTL	6,0	0,4	7,1	0,4	7,8	0,4
CDWf5	4,9	0,4	6,7	0,1	7,5	0,2
CDWf10	5,1	0,2	6,3	0,0	7,2	0,2

Tabela 3.11 - Resultados das resistências médias à compressão (em MPa) e os correspondentes desvios padrão

Proвете	7 d	Desvio padrão	28d	Desvio padrão	90d	Desvio padrão
CTL	35,5	1,0	46,3	0,9	53,4	0,5
CDWf5	28,5	1,2	42,3	1,6	51,3	0,8
CDWf10	28,4	3,7	38,1	1,3	46,8	0,7

Figura 3. 28 – Resultados médios da resistência à flexão aos 7d, 28d e 90d

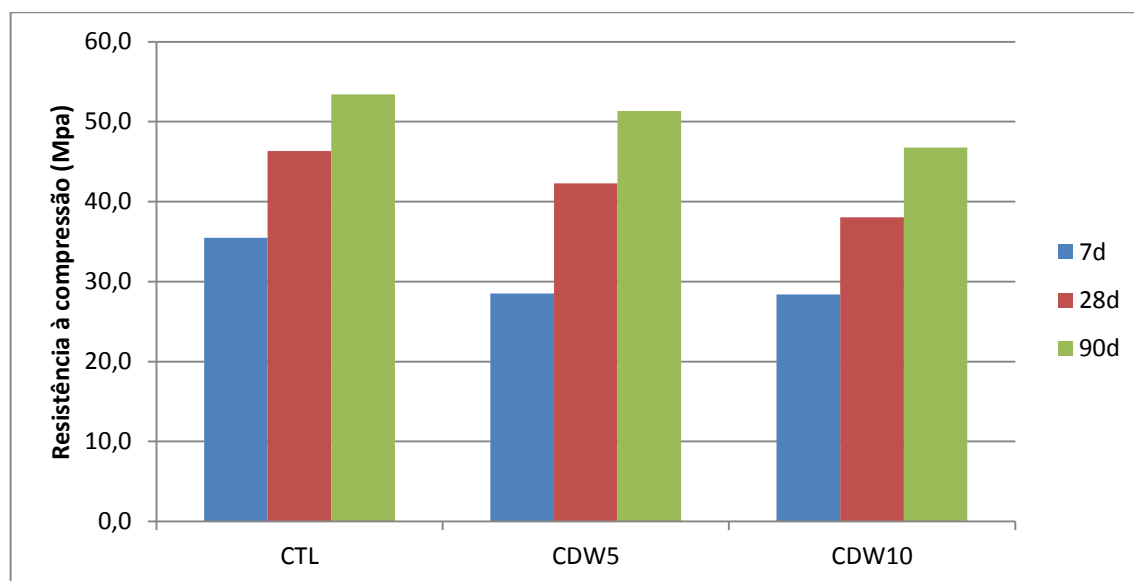


Figura 3. 29 – Resultados médios da resistência à compressão aos 7d, 28d e 90d

Como seria de esperar as resistências aumentam com a idade do provete e diminuem com o aumento da percentagem de substituição do cimento.

3.3.7. RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO

A durabilidade é uma questão importante em estruturas de betão expostas a ambientes agressivos. Muitos fenómenos ambientais podem influenciar significativamente a durabilidade das estruturas do betão armado. A carbonatação é um dos principais fatores que provoca a deterioração das estruturas.

A carbonatação resulta da reação dos produtos de hidratação da solução porosa com o dióxido de carbono que existe no ar provocando uma redução do pH da solução. (Yang et al., 2002) De facto o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), um dos produtos de hidratação do cimento, reage com o dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera circundante produzindo carbonato de cálcio (CaCO_3), podendo promover a corrosão do aço. (Kim et al., 2008) O pH do betão antes da carbonatação é cerca de 12-13. Após o fenómeno, o pH diminui para valores iguais ou inferiores a 9, provocando uma destruição da película passiva que envolve o aço e eventualmente corrosão acelerada uniforme.

A corrosão induzida por carbonatação pode causar o desenvolvimento de fendas e diminuição da durabilidade do betão, tendo como consequências a redução da secção do aço e destacamentos do betão de recobrimento. Porém, reduz a permeabilidade a iões cloreto na superfície do betão e diminui a porosidade superficial causada pela formação de CaCO_3 , que ocupa um maior volume do que o inicialmente existente, Ca(OH)_2 (Yang et al., 2002). Como resultado, a resistência e dureza do betão aumentam (Kim et al., 2008).

Para a determinação da resistência à carbonatação executou-se o procedimento de acordo com a especificação do LNEC E-391.

Os provetes de argamassa com as dimensões 40x40x160mm, após a descofragem, passaram por um processo de preparação. Inicialmente foram curados em água a $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ durante 14 dias e

posteriormente foram colocados na câmara de fluência com uma humidade relativa (HR) de $(50\pm 5)\%$ HR e $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ até atingirem 28 dias de idade.



Figura 3. 30 - Provete na câmara de fluência

Após a preparação, as amostras foram colocadas numa câmara que se encontra com HR de 55-65% e uma temperatura de $23^{\circ}\text{C}\pm 3^{\circ}\text{C}$ e uma alimentação de ar com $5\pm 0,1\%$ CO_2 durante um mês e meio. Os provetes ficaram afastados entre si 2,5 cm e a face marcada com 40x40mm ficou assente na base da câmara. Ao fim deste período retirou-se um centímetro de cada uma das amostras e pulverizou-se as suas secções retangulares com fenolftaleína. Sendo que a fenolftaleína reage de acordo com o nível de pH do provete, onde uma cor rosa forte representa um pH elevado (zona isenta de carbonatação) e as zonas incolores representam um pH baixo (zona carbonatada). Inicialmente, o corte realizou-se no topo do provete, contudo os resultados entre espécimes com a mesma composição não eram semelhantes entre si e a carbonatação tinha sido total em alguns dos provetes. Compreendeu-se então que o tempo na câmara tinha sido demasiado, tendo induzido carbonatação total no topo do provete, visto que a carbonatação observada resultava do fluxo de CO_2 pelo topo e não apenas pelas faces laterais, que era o objetivo. A solução encontrada foi a aplicação do corte a meio do provete, verificando-se que a carbonatação era homogênea entre os provetes.



Figura 3. 31 - Corte dos provetes

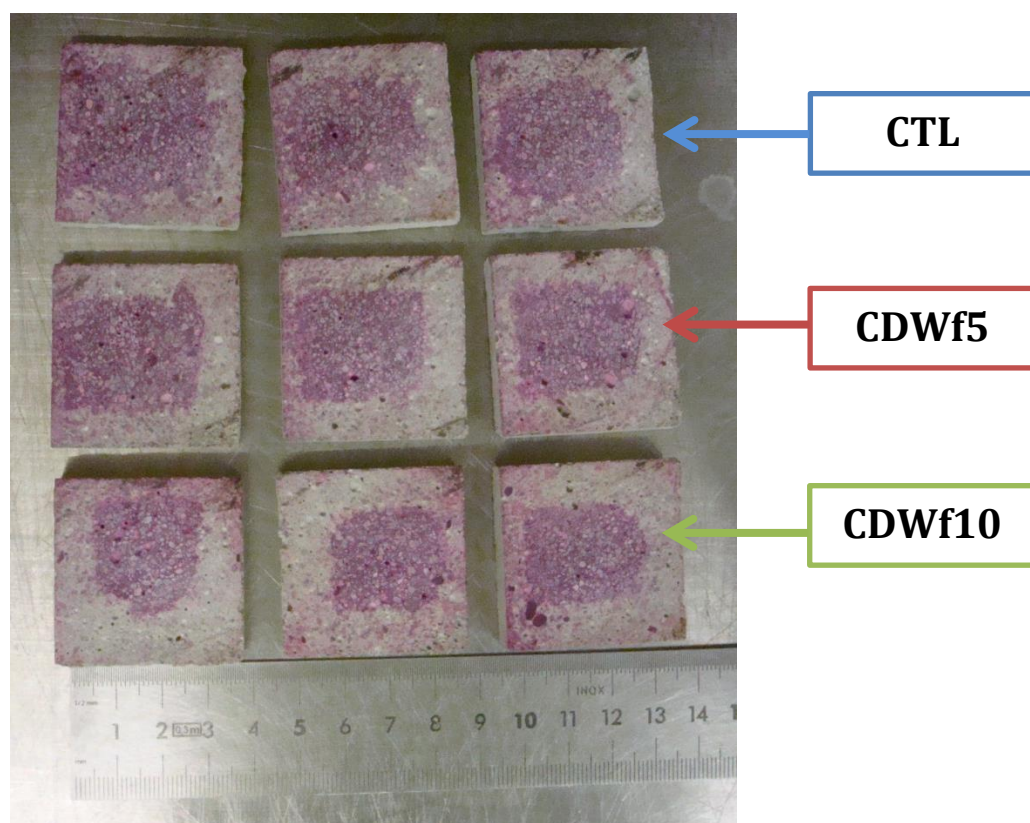


Figura 3. 32 - Resultado da reação entre a argamassa e fenolftaleína

A especificação do LNEC aconselha a efetuar a medição da profundidade de carbonatação de acordo com a recomendação da RILEM CPC-18. Porém, devido à irregularidade da frente de carbonatação mediu-se a área da zona isenta de carbonatação no AutoCad tendo-se como ponto de referência uma régua (ver Figura 3. 32) que permitiu a conversão das áreas recolhidas no programa em áreas reais. Sendo que a área carbonatada resulta da diferença entre a área da face do provete (4x4cm) e a área real. A alteração do método de medição permitiu obter resultados mais exatos.

Tabela 3. 10 - Resultados do ensaio de carbonatação

Provete	Área carbonatada (cm ²)	Média (cm ²)	Desvio padrão
CTL -1	8,8	8,7	0,3
CTL -2	8,8		
CTL -3	8,4		
CDWf5-1	9,7	9,3	0,3
CDWf5-2	9,1		
CDWf5-3	9,3		
CDWf10-1	10,1	10,6	0,4
CDWf10-2	10,8		

CDWf10-3	10,7
-----------------	------

Através da área carbonatada, calculou-se a profundidade de penetração média (h) para cada argamassa, como se pode observar na imagem seguinte.

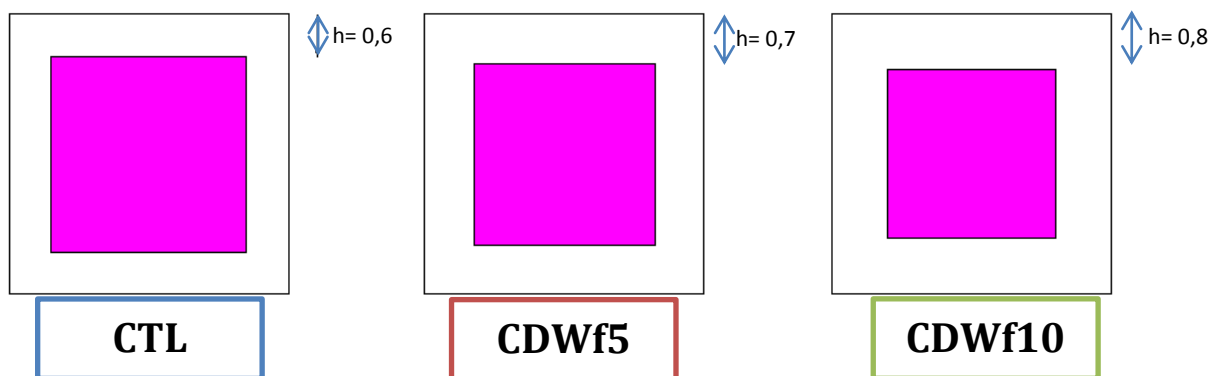


Figura 3. 33 - Esquema das profundidades de carbonatação para cada espécime

Verificou-se que o provete de CTL sofreu uma menor carbonatação, e que quanto maior a percentagem de adição nos espécimes maior será a profundidade de carbonatação.

3.3.8. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Com o intuito de avaliar a influência dos resíduos utilizados como adições na durabilidade do betão, é importante considerar a facilidade com que a água penetra pelos seus poros e fendas, visto que, a água é o principal meio de transporte de substâncias nocivas no betão. Um dos fenómenos envolvidos é a absorção pelo que se torna importante a avaliação da absorção de água por capilaridade.

O movimento de absorção de água por capilaridade nos vazios capilares do betão endurecido é bastante lento sendo a causa de retração por secagem do betão. Quando a retração é impedida por obstáculos, por exemplo a armadura, ocorre fissuração que conduz a uma redução da durabilidade do betão. Outro problema de durabilidade é o transporte de agentes agressivos dissolvidos na água do ambiente para o interior do betão, movimento causado por forças capilares (M.H. Ozkul e Baskoca, 1997).

Na realidade a absorção de água por capilaridade é definida pela entrada de água na rede porosa do betão devido a forças capilares, que resulta da diferença de pressão entre a superfície livre da água no exterior do betão e a sua superfície nos poros capilares, sendo dependente do diâmetro capilar. Assim sendo, quanto menor for o coeficiente de absorção do material, mais protegida estará a estrutura (Matos, 2010).

O ensaio executado encontra-se em conformidade com a especificação E-393 do LNEC e RILEM TC 116-PCD. Para este efeito, foram produzidos 3 provetes cilíndricos, com um diâmetro de 100mm e 50mm de altura. Depois da desmoldagem, ficaram submersos em água durante 2 meses e seguidamente foram colocados na estufa a 40°C durante 14 dias, no final do processo de secagem pesaram-se os provetes (M_0). Nos ensaios de absorção capilar, por lapso, os provetes CDWf5 e CDWf10 foram colocadas na estufa a 120 C, pelo que os resultados não devem ser considerados e inviabilizando a comparação dos resultados.

Na véspera foi preparado o sistema de ensaio, nomeadamente:

- Colocação da grelha;
- Colocação dos provetes de teste de modo a que a superfície inferior estivesse em contacto com uma altura de água de $3 \pm 1\text{mm}$ a partir da base do provete;
- Regulação da torneira, que permite a entrada da água no reservatório, de forma a manter o nível de água constante através de um tubo de saída colocado a determinada altura da parede do reservatório.

No dia do ensaio, colocaram-se os provetes a ensaiar no reservatório. O ensaio decorreu durante 24 horas, os provetes foram pesados em períodos de tempo determinados (M_i) pela recomendação da RILEM TC 116-PCD.

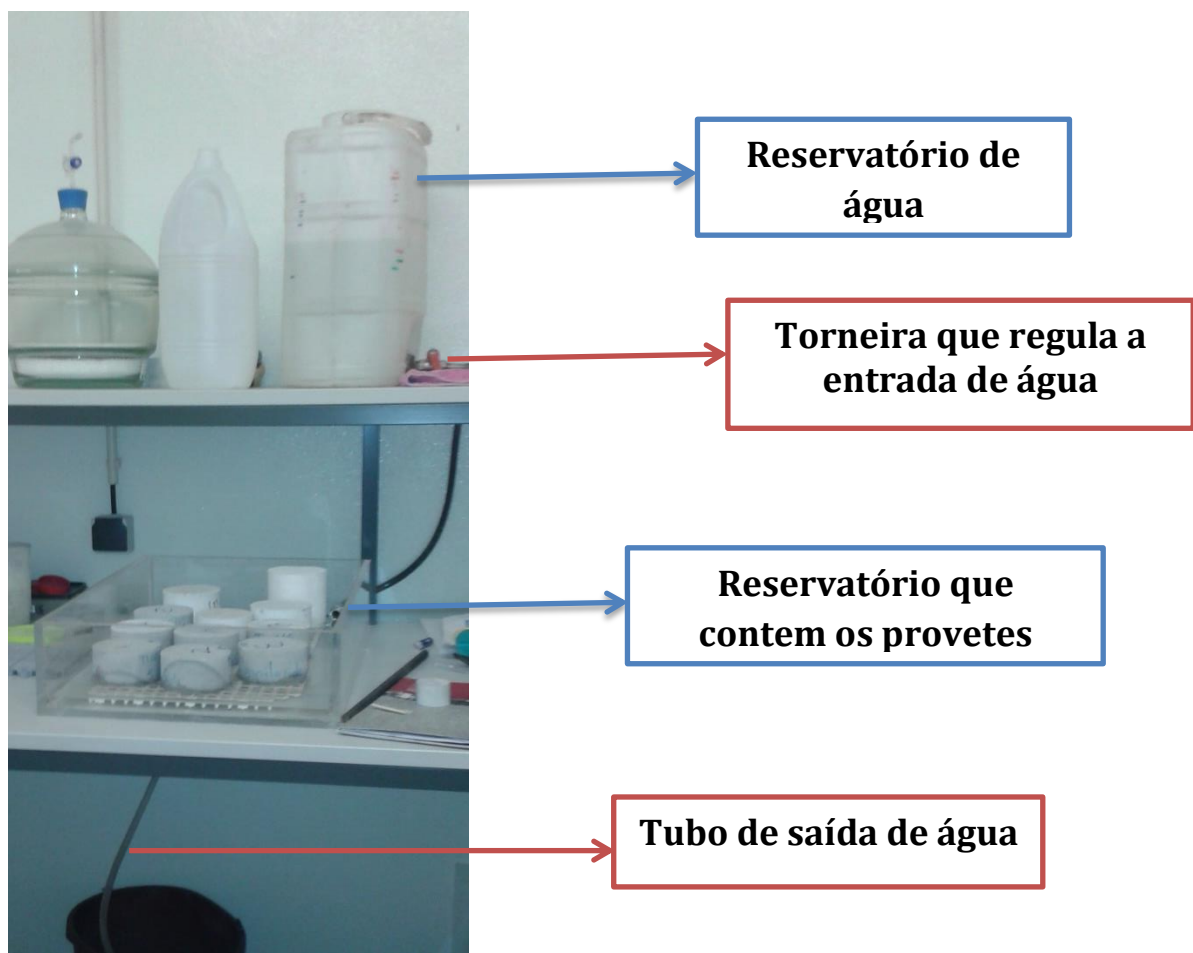


Figura 3. 34 - Esquema do ensaio de capilaridade

A partir dos dados recolhidos foi possível calcular a absorção capilar no tempo através da divisão entre o aumento de massa ($M_i - M_0$) e a área da face inferior do provete em contacto com a água. Apresentam-se na Figura 3, os resultados dos coeficientes de absorção

Como a curva de absorção é praticamente linear nas primeiras horas de ensaio, é adequado utilizar o coeficiente de absorção (S), que correspondente ao gradiente da reta obtido por regressão linear da curva de absorção nas primeiras horas:

$$A = a_0 + S * t^{0.5}$$

Sendo:

A é absorção de água por unidade de superfície do betão, em mg/mm^2 ;

S é o coeficiente de absorção do provete, em $\text{mg}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$;

t é o tempo desde a pesagem do instante inicial, em minutos;

a_0 é a água inicialmente absorvida pelos poros, em mg/mm^2 ;

Os coeficientes de absorção foram calculados considerando as primeiras 4h30m do ensaio. As curvas de absorção obtidas para as argamassas então representadas no gráfico seguinte:

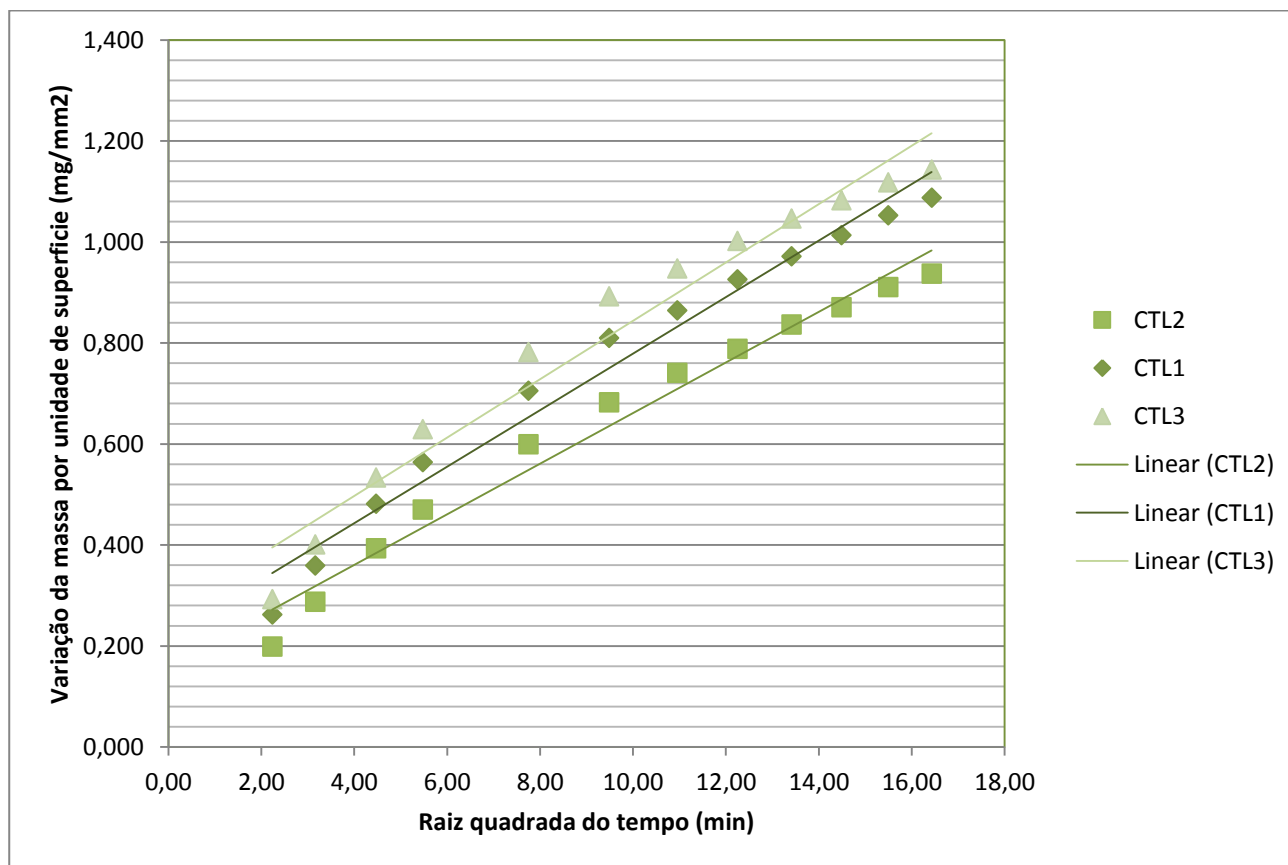


Figura 3. 35 - Retas de absorção relação ao tempo durante as primeiras 4h30m

Tabela 3. 11 - Resultados dos coeficientes de absorção de água por capilaridade

Provete	S (mg/(mm ² .min ^{0,5}))	S médio (mg/(mm ² .min ^{0,5}))	Desvio padrão
CTL 1	0,0560	0,0546	0,0040
CTL 2	0,0501		
CTL 3	0,0578		

3.3.9. PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Os cloretos causam mais preocupações no betão armado do que no betão simples. No betão simples, os cloretos alteram o tempo de presa e a velocidade do endurecimento, não trazendo consequências danosas para o betão endurecido. Em relação ao betão armado, não se pode desprezar a ação dos cloretos. A presença dos mesmos no betão provoca a corrosão das armaduras, conduzindo a uma redução da vida útil das estruturas de betão.

Os cloretos provocam a destruição localizada da camada passiva (camada que protege o aço), deixando o aço suscetível a corrosão localizada e profunda. Além da diminuição da secção da armadura, esta reação provoca expansão devido à ferrugem formada pela oxidação provocada pelos cloretos, que tem um volume maior que o material inicial. Esta expansão leva ao rompimento do revestimento, acelerando o processo de corrosão (Coutinho, 2002).

Os iões que causam a deterioração têm, em geral, origem externa, como da água do mar, da água subterrânea e de sais descongelantes usados para o degelo em climas frios.

Para determinar a resistência à penetração dos cloretos, executou-se o procedimento descrito na especificação do LNEC E-463, obtendo-se o coeficiente de difusão dos cloretos em regime não estacionário.

Os moldes utilizados neste ensaio são cilíndricos com diâmetro de 100mm e uma altura de 50mm e foram preenchidos com argamassa com a composição descrita na norma NP EN 196-1.

O princípio deste ensaio consiste em aplicar nos topos circulares do provete (direção pela qual ocorre a penetração dos cloretos) um potencial elétrico que irá forçar o transporte de iões, que migram para o interior.

Após o processo de moldagem descrito no ponto 3.3.1, os provetes foram desmoldados (24±2) h depois da amassadura e ficaram submersos em água durante 2 meses.

Na véspera do ensaio, os provetes foram retirados da câmara de cura, limpou-se a água em excesso e colocaram-se na câmara de vácuo com os topos expostos a uma pressão de 1 a 5 kPa durante uma hora. Com a bomba de vácuo ainda em funcionamento, encheu-se o recipiente com solução saturada de hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) até que os provetes ficassem submersos na solução. Após 3 horas, desligou-se o vácuo e os espécimes permaneceram na solução durante (18±2)h.



Figura 3. 36 - Provetes na camara de vácuo

Em seguida, a face que esteve mais próxima da camada externa e ficou em contacto com a solução de 10 % de NaCl e a face oposta ficaram em contacto com uma solução de NaOH. Entre os topos de cada provete aplicou-se um potencial elétrico, que forçou por migração, o transporte de iões através da argamassa. No presente programa experimental, a corrente de voltagem aplicada foi de 25V para todos os provetes.

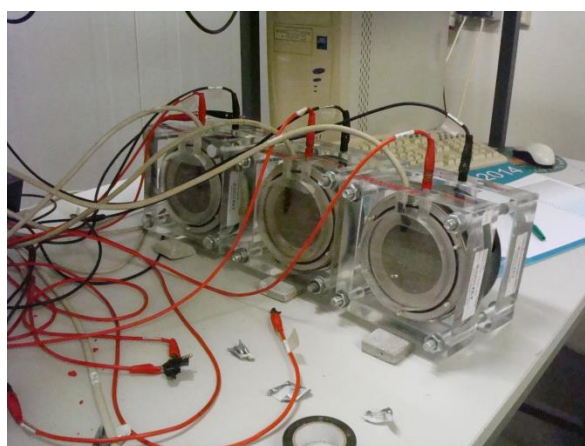


Figura 3. 37 - Provetes sujeitos a um potencial elétrico

Após a conclusão do processo de mitigação, os provetes sofreram uma compressão linear que resultou na divisão do espécime em duas partes. Pulverizaram-se as superfícies retangulares resultantes da rotura com solução de nitrato de prata, que permitiu visualizar a profundidade de penetração dos cloretos. Quando o precipitado de prata se tornou claramente visível, procedeu-se à medição da profundidade de 10 em 10 mm segundo o diâmetro do provete, com uma folga de 10 mm em cada bordo, efetuando-se no total sete medições.

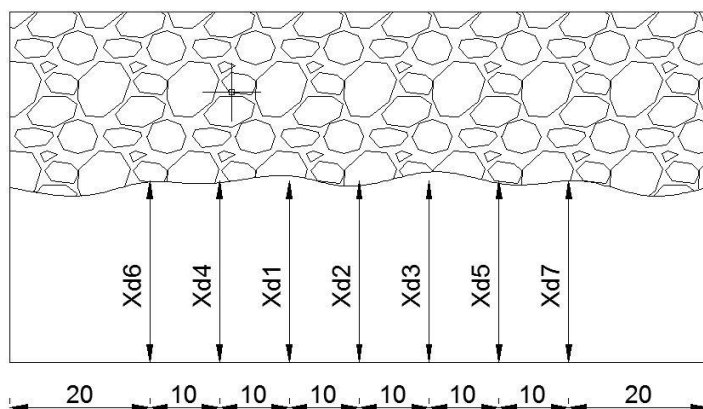


Figura 3. 38 - Esquema das medições realizadas na face do provete

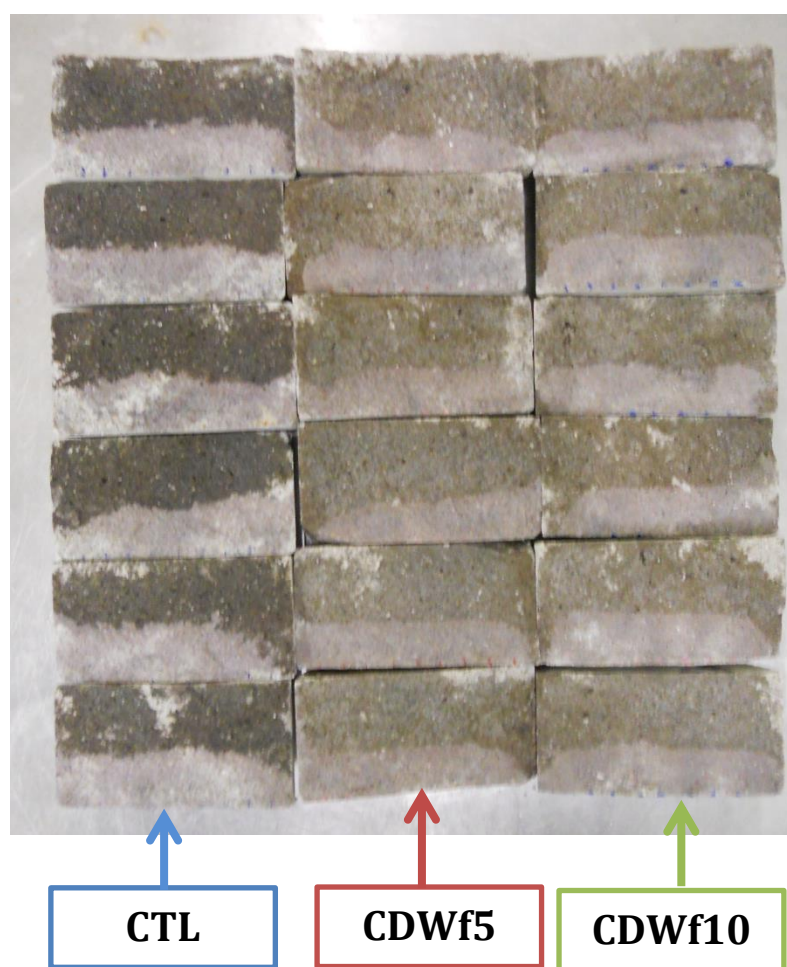


Figura 3. 39 - Provete após a aplicação do nitrato de prata

Com os resultados da profundidade de penetração através do precipitado branco visível do cloreto de prata, calculou-se um valor médio de penetração, X_a , necessário para o cálculo do Coeficiente de Difusão em regime não estacionário, D_{ns} . O D_{ns} é obtido com base na seguinte equação:

$$D_{ns} = \frac{R * T}{z * F * E} * \left[\frac{X_d - \alpha * \sqrt{X_d}}{t} \right]$$

Sendo:

$$E = \frac{U - 2}{L}$$

$$\alpha = 2 * \sqrt{\frac{R * T}{z * F * E}} * \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2 * 0,07}{2} \right)$$

D é o coeficiente de difusão no estado não estacionário, em m²/s;

Z é o valor absoluto da valência do ião, para cloretos z=1;

F é a constante de Farady, F= 9,648x10⁴ V.mol

U é o valor absoluto da voltagem aplicada, em V;

R é a constante de gases perfeitos, R=8,314 V.mol

T é o valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica, em °C;

L é a espessura do provete, em mm;

X_d é o valor médio da profundidade de penetração, em mm;

t é a duração do ensaio, em horas;

erf⁻¹ é o inverso da função do erro.

Tabela 3. 12 - Resultados do coeficiente de difusão no estado não estacionário

Provete	Xdmédio (mm)	Dns (10 ⁻¹² m ² /s)	Dns médio (10 ⁻¹² m ² /s)	Desvio padrão
CTL - 1	20,4	14,2	13,9	0,3
CTL - 2	20,2	14,0		
CTL - 3	19,6	13,6		
CDWf5-1	19,3	13,4	12,6	1,3
CDWf5-2	16,4	11,2		
CDWf5-3	19,1	13,3		
CDWf10-1	18,9	13,1	13,7	0,7
CDWf10-2	20,6	14,4		
CDWf10-3	19,3	13,4		

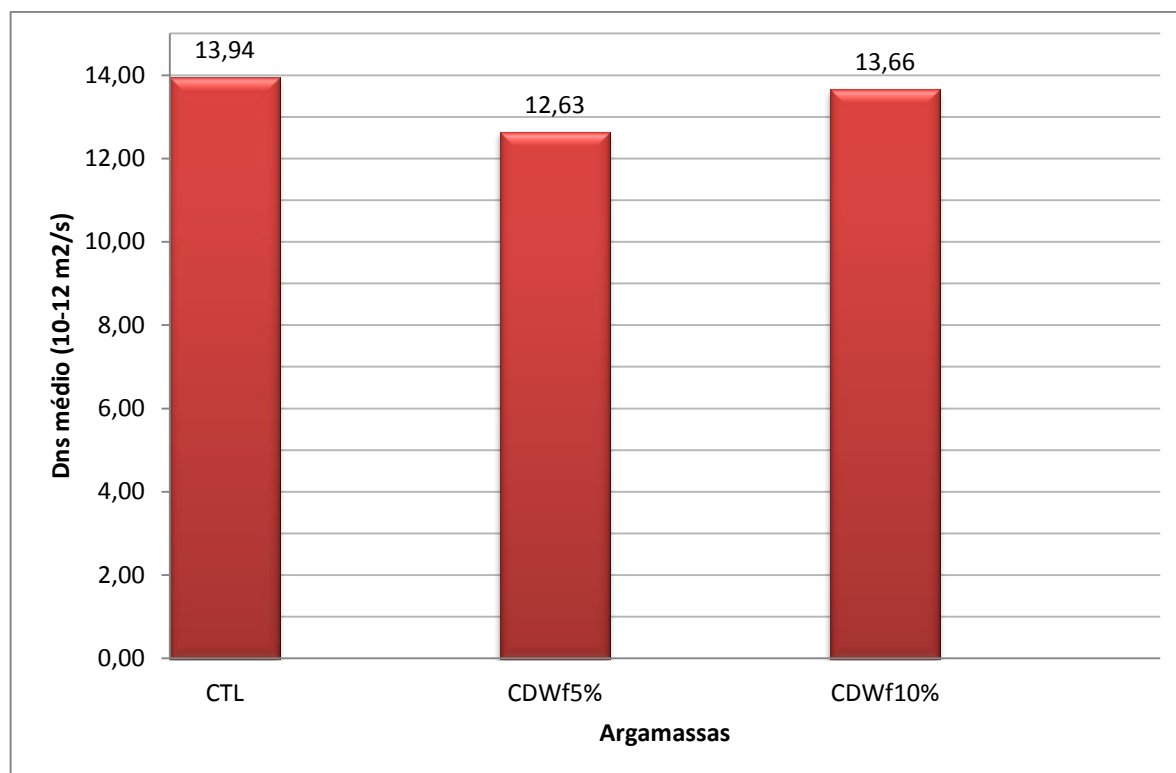


Figura 3. 40 - Representação gráfica do coeficiente de difusão médio

3.3.10. REACÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

A reação Álcali-Sílica (ASR) é uma reação destrutiva que causa fissuração e expansão do betão, provocando uma diminuição da durabilidade e afeta inúmeras estruturas mundialmente (Boukari, Rivard, Bulteel, & Abriak, 2010). A reação desenvolve-se na maioria dos casos a longo prazo, sendo que ainda não existe uma solução aceitável.

ASR é uma reação que ocorre no betão entre sílica potencialmente reativa presente nos agregados e hidróxido alcalino dissolvido na solução porosa. A química da solução porosa altera-se constantemente. As expansões e os danos nas estruturas de betão provocadas pela reação ASR vão-se desenvolvendo enquanto a fase reativa ou os hidróxidos alcalinos não diminuírem abaixo de um limite crítico (Rivard, Bérubé, & Oll, 2004).

A sílica é dissolvida nas soluções alcalinas, formando inicialmente um gel de sílica semelhante à opala (forma de quartzo). Mais tarde, o gel absorve e liga-se aos álcalis, formando-se o gel álcalis-sílica. A expansão é causada pela absorção de água externa pelo gel silico-alcalino resultante. Assim, a expansão só se verifica quando o betão se encontra exposto a um ambiente húmido, e quando a humidade relativa no betão é superior a cerca de 85%. Mais tarde, em contacto com o hidróxido de cálcio da pasta de cimento, o gel silico-alcalino transforma-se em primeiro lugar, num gel silico-cálcico-alcalino não expansivo e, eventualmente, transformar-se-á num produto CSH (LAGERBLAD e TRAGARDH, 1994). A humidade e temperatura provocam variações no gel e nas pressões exercidas nos poros do betão, provocando diferentes graus de deterioração.

A quantidade total de álcalis presente no betão provem do cimento, das soluções dos poros e das adições. Segundo Kyhara, a intensidade e a velocidade a que ocorre expansão do betão causada por ASR depende da concentração e natureza da fase reativa do agregado (Brito, 2008).

Em suma para o desenvolvimento desta reação é necessário que estejam estabelecidas as condições ótimas. Para que a reação ocorra no betão tem que existir álcalis no betão, sílica reativa, hidróxido de cálcio e água em quantidades suficientes e específicas.

Para analisar a expansão provocada pela ASR, realizou-se o procedimento descrito na norma internacional americana ASTM C 1567-08 que remete para a norma ASTM C1260 -14, porém com algumas alterações.

O método de ensaio preconizado na ASTM C1260-14 permite detetar a reatividade potencial de um dado agregado que se pretende utilizar em betão em termos de reação alcalis sílica que venha a provocar expansão interna destrutiva. Com a ASTM C 1567 parte-se de um agregado que se sabe ser reativo e utilizando um procedimento semelhante à ASTM C 1260 verificou-se a influência de utilização de ligantes diferentes nos resultados das respetivas expansões.

Assim, para avaliar a ASR foi realizado o ensaio da barra de argamassa segundo a norma americana ASTM C 1260, porém, algumas alterações foram feitas, nomeadamente na proporção de materiais secos, em massa, a utilizar numa amassadura. Segundo o ponto 7.4.3 da norma, as proporções seriam 2,25 de areia e 0,47 de água, no entanto, foram preferidas as relações referidas na NP EN 196-3, 3 e 0,5 de água e areia, respetivamente.

A areia utilizada também é diferente em termos da granulometria recomendada pela ASTM 1567, usando-se a areia preconizada na NP EN 196-1. Segundo especialista do LNEC estas modificações não acarretam alterações nos resultados obtidos. Visto que, como o presente trabalho é um estudo comparativo, os procedimentos das normas podem ser alterados desde que sejam executados da mesma forma nas diferentes composições de argamassa.

Para cada argamassa foram produzidos dois provetes com as seguintes dimensões: 25x25x285mm.

Após a amassadura e medição da trabalhabilidade, preencheram-se os moldes com duas camadas de argamassa, sofrendo uma compactação manual aquando da colocação de cada uma das camadas, tendo-se em especial cuidado a zona em volta dos parafusos.



Figura 3. 41 - Provetes moldados (esq.) e numeração das faces dos provetes (dir.).

Os provetes foram desmoldados, (24 ± 2) h após a amassadura, e identificaram-se todas as faces para que as medições ocorressem sempre da mesma forma. Estes foram colocados em caixas com água a uma temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e permaneceram na estufa a $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$ durante um período de 24h.



Figura 3. 42 - Provete submersos em água

Após esse período, retirou-se e limpou-se a água em excesso dos provetes, procedeu-se à leitura zero. Este procedimento não pode demorar mais de (15 ± 5) s.

Substituiu-se a água por uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), que estava a $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$. Após os provetes ficarem totalmente submersos pela solução, foram colocados novamente na estufa, sendo retirados para executar medições a diferentes idades. Durante este período sempre que necessário foi adicionada solução para que os provetes ficassem sempre imersos na solução.

Os resultados do ensaio foram tratados da seguinte forma:

- Efetuaram-se as medições do comprimento real de cada uma das faces do provete – L_i (mm);
- Calculou-se a média aritmética (L_x) do comprimento real de cada provete;

$$L_x = \frac{\sum_{i=1}^4 L_i}{4}$$

- Calculou-se a expansão, a partir da seguinte fórmula:

$$e = \frac{L_x - L_o}{250} * 100$$

A expansão é o quociente entre a diferença entre a média aritmética do comprimento de cada medição e a média aritmética do comprimento na leitura zero e a distância entre os parafusos (250 mm).

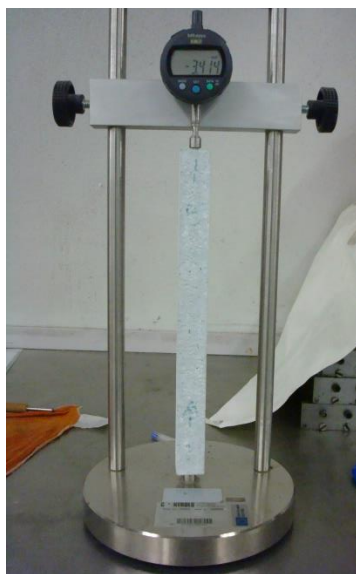


Figura 3. 43 - Exemplo de uma medição

3.3.10.1. ASR EM ARGAMASSAS COM CDW

Os valores das expansões obtidos encontram-se na seguinte tabela:

Tabela 3. 13 – Valor médio da expansão para as argamassas com CDWf

Dias em NaOH	Expansões médias (%)		
	CTL	CDWf5	CDWf10
0	0,00	0,00	0,00
2	-0,01	0,00	-0,01
6	0,03	0,03	0,02
9	0,05	0,04	0,03
14	0,08	0,08	0,06
19	0,12	0,10	0,09
26	0,18	0,16	0,13

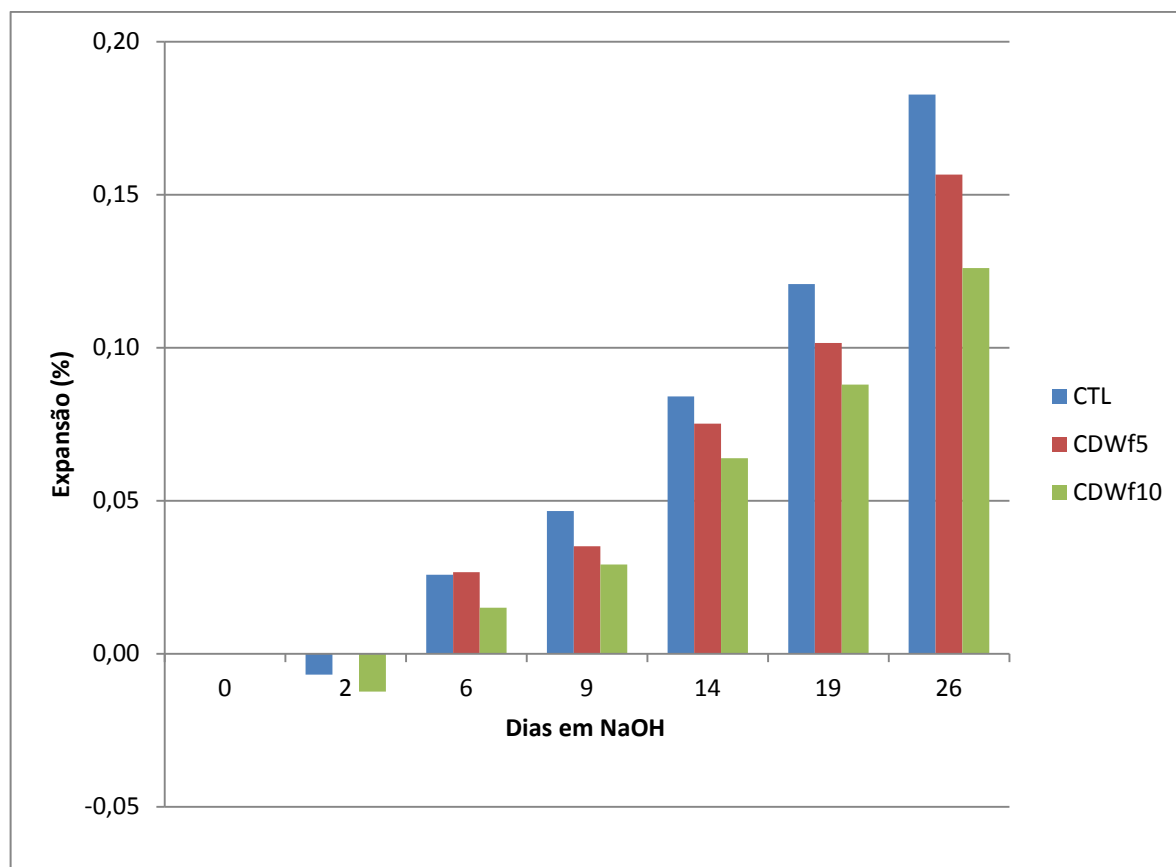


Figura 3. 44 – Representação gráfica das expansões dos provetes com CDWf em comparação com o provete de CTL

Segundo a especificação E-461 do LNEC, para averiguar a reatividade de agregados se a expansão for inferior a 0.10% ao fim de 14 dias o agregado é da Classe I (agregado não reativo), entre 0.10% e 0.20% da Classe II (agregado potencialmente reativo) e superior a 0.20% Classe III (agregado potencialmente reativo), sendo os da classe III mais reativos do que os da classe II.

No presente trabalho, o agregado resultou em não-reativo da Classe I quer nas argamassas de controlo, quer nas de adição. A expansão devido à ASR foi inferior nos provetes com substituto parcial do cimento em relação às do provete de controlo, verificando-se ainda que quanto maior a percentagem de substituto de cimento menor a expansão.

3.3.10.2. ASR EM ARGAMASSA COM FÍLER

Com o intuito de compreender a contribuição do CDWf para a diminuição da expansão causada pela ASR, produziram-se argamassas onde o substituto parcial do cimento passou a ser o fíler. Procurou-se um fíler com uma granulometria genericamente semelhante ao CDWf e, como teoricamente é quimicamente inerte, não se alterando o esqueleto sólido da argamassa seria em princípio possível, compreender se a redução do cimento teria sido a causa principal para a diminuição das expansões.

No presente procedimento produziu-se um provete de controlo (CTL) e provetes com substituto de 5% e 10% de cimento por fíler. O cimento usado neste ensaio foi CEM I 42,5 R, o lote é diferente do utilizado nos ensaios anteriores, porém o local de proveniência foi o mesmo.

Figura 3. 45 - Resultados das expansões dos provetes com fíler

Dias em NaOH	Expansões		
	CTL	fíler5	fíler10
0	0,00	0,00	0,00
2	0,00	-0,02	-0,01
6	0,02	0,01	0,02
9	0,03	0,03	0,03
14	0,09	0,08	0,09
19	0,11	0,10	0,11
26	0,15	0,14	0,16
28	0,21	0,20	0,23

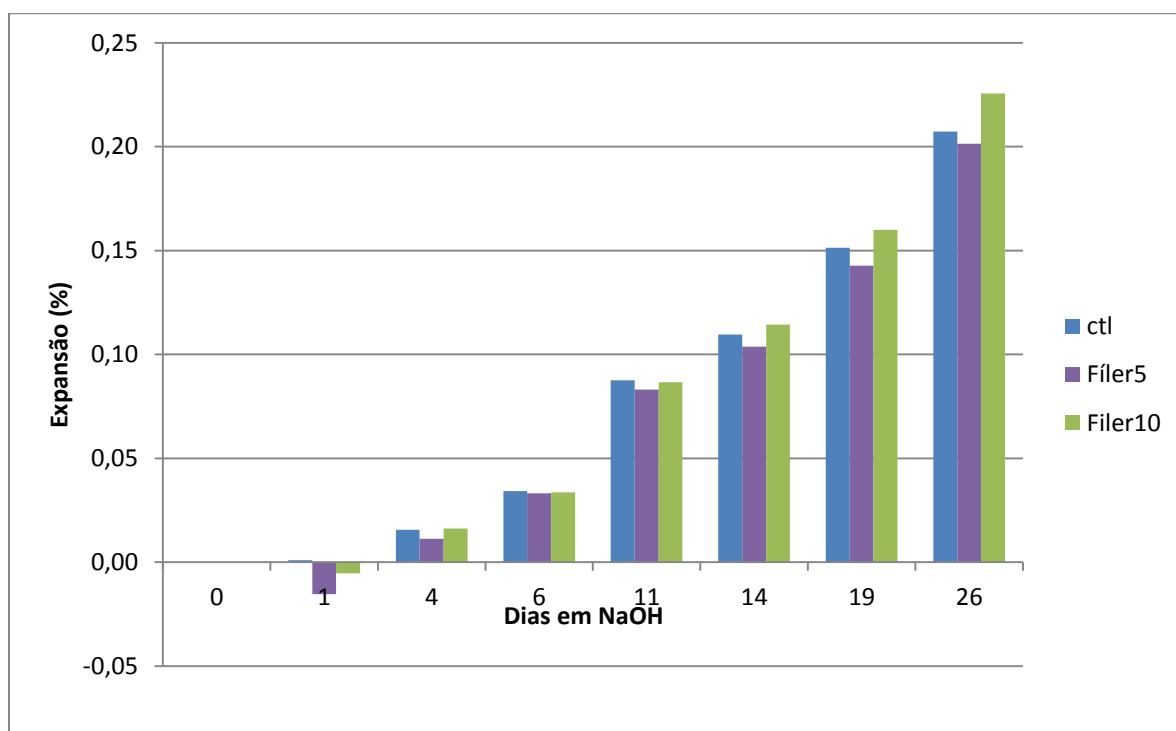


Figura 3. 46 - Representação gráfica das expansões dos provetes com fíler em comparação com o provete de CTL

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- André, J. (2013). Agregados para Betão- Substancias prejudiciais. *Betão N°31*, 20-32.
- ASTM. (2008). *Standard Specification for Flow Table for use in Tests of Hidraulic Cement ASTM C230/C230M*.
- ASTM. (2013). *Standard Specification for Flow Table for use in Tests of Hidraulic Cement ASTM C1437-13*.

- ASTM. (2014). *Standard Test Method for Potencial Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar bar Method) ASTM C1260-14*. ASTM International.
- ASTM. (s.d.). *Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method) ASTM C1567-08*.
- Boukari, Y., Rivard, P., Bulteel, D., & Abriak, n.-E. (2010). *Multi-scale diagnosis of concrete damage caused by Alkali-Silica reaction*.
- Brito, J. d. (2008). O panorama nacional das reacções álcalis-sílica em betões. *Engenharia civil . UM* N° 32, 57-68.
- Civil, L. N. (2004). *determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário. E-463*. Portugal.
- civilblog. (2014). *What is Workability of Concrete & What is its Importance and Significance?* Obtido em 2015, de <http://civilblog.org/2014/04/04/what-is-workability-of-concrete-what-is-its-importance-and-significance/>
- Coutinho, J. (2002). *Materiais de Construção 2 – Ligantes. actualização*. Atualizado 2014.
- Coutinho, J. (2003). 2. medição de trabalhabilidade. In *MC2* (p. 29).
- Coutinho, J. (2014). *Materiais de Construção 2 – Ligantes. actualização*.
- Coutinho, J. (2014). *MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO 2: ligantes. Atualização 2014*.
- Coutinho, J. s. (2002). *Ciência de Materiais - 1ª Parte, Documento Provisório 2002*.
- Desconhecido. (s.d.). Obtido em 2015, de <http://professor.ucg.br/siteDocente/admin/arquivosUpload/14878/material/concreto%20-%20propriedades%20no%20estado%20fresco.pdf>
- Instituto Português da Qualidade. (2006). *Métodos de ensaio de cimentos, Parte 1: Determinação das resistências mecânicas*.
- Instituto Português da Qualidade. (2000). *ANÁLISE GRANULOMÉTRICA NP EN 933-1*.
- Instituto Português da Qualidade. (2002). *Agregados para betão NP EN 12620*.
- INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE. (2002). *Ensaio das propriedades gerais dos agregados Parte 2: Métodos de redução de amostras laboratoriais NP EN 932-2*.
- Instituto Português da Qualidade. (2006). *Métodos de ensaio de cimentos parte 1: determinação das resistências mecânicas NP EN 196-1*.
- Instituto Português da Qualidade. (2009). *Métodos de ensaio de cimentos. Parte 3: determinação do tempo de presa e expansibilidade NP EN 196-3*.
- Instituto Português da Qualidade. (2009). *Tests for chemical properties of aggregates Part 1: Chemical analysis EN 1744-1*.
- Kaszynska, M. (2004). HEAT OF HYDRATION AND STRENGTH DEVELOPMENT. In K. K. J. Weiss (Ed.), *International RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering: A Tribute to Arnon Bentur* (p. 23). RILEM Publications SARL.

- Kim, J.-K., Kim, C.-Y., Yi, S.-T., & Lee, Y. (2008). Effect of carbonation on the rebound number and compressive strength of concrete. *journal homepage: www.elsevier.com/locate/cemconcomp*, 139–144.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (1979). *Cimentos. Determinação da massa volúmica. E 64*. Lisboa.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (1993). *Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade. E 393*. Lisboa.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (2004). *Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionario. E-463*. Portugal.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (1993). *Betões: Determinação da resistncia à carbonatação E-391*. Lisboa: LNEC.
- LAGERBLAD, B., & TRAGARDH, J. (1994). Alkali-silica reaction in high strength concrete. In H. Sommer, *nternational RILEM Workshop on Durability of High Performance Concrete*. RILEM Publications SARL.
- LAGERBLAD, B., & TRAGARDH, J. (1994). Alkali-silica reaction in high strength concrete. In H. Sommer, *International RILEM Workshop on Durability of High Performance Concrete*. RILEM Publications SARL.
- Lura, P., Durand, F., Loukili, A., Kovler, K., & Jensen, O. M. (2006). COMPRESSIVE STRENGTH OF CEMENT PASTES AND MORTARS WITH SUPERABSORBENT POLYMERS. In *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation*.
- Qualidade, I. P. (2006). *Métodos de ensaio de cimentos, Parte 1: Determinação das resistências mecânicas*.
- RCD. (s.d.). Obtido de RCD.pt
- RILEM TC 116-PCD. (1999). Recommendation of TC 116-PCD: Tests for gas permeability of concrete. *Materials and Structures vol. 32*.
- Rivard, P., Bérubé, M.-A., & Oll, J.-P. (2004). nternational RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering: A Tribute to Arnon B. In K. K. J. Weiss, *Experimental data on the alkalinity evolution of the pore solution in concrete affected by alkali-silica reaction*. RILEM Publications SARL.
- Yang, C. C., Huang, R., & Chi, J. M. (2002). EFFECTS OF CARBONATION ON MECHANICAL. *Journal of Marine Science and Technology, Vol. 10, No. 1*, 14-20.

4

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

O capítulo anterior destinou-se à descrição dos materiais utilizados e dos ensaios desenvolvidos.

O presente capítulo engloba a análise e discussão dos resultados obtidos nos ensaios enunciados no capítulo anterior.

4.2. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE PROPRIEDADES E RESULTADOS

4.2.1. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Para calcular o desempenho de cada uma das propriedades, enumeradas no capítulo anterior, das argamassas com substituto parcial do cimento em relação à argamassa de controlo, utilizou-se a equação seguinte:

$$Desempenho = \frac{X - X_{CTL}}{X_{CTL}} * 100$$

Sendo:

X – Resultado da propriedade X para o material com substituição de cimento por CDW;

X_{CTL} – Resultado da propriedade X para a material de controlo.

Um desempenho positivo ou negativo representa um melhor ou pior comportamento do material que tem na sua constituição CDW em comparação com a argamassa de controlo.

4.2.2. DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA

A solução resultante do ensaio da amostra de CDW apresentou uma cor mais clara do que a cor da solução padrão, o que permitiu concluir que o material em estudo não contém quantidades consideráveis de matéria orgânica.

De facto à vista desarmada, a amostra de CDW aparentava conter uma grande quantidade de matéria orgânica. Assim, era importante perceber se continha este tipo de impureza em quantidade apreciável que pudesse prejudicar as propriedades em estudo. Como o referido no ponto 3.2.2.2., a matéria orgânica é indesejável visto que causa o retardamento dos tempos de presa, diminuição da durabilidade e da resistência do betão.

4.2.3. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE VARRIMENTO (MEV) EM PARTÍCULAS DOS CDW MOÍDOS

Analisando a Figura 3.10, onde se encontram denotados os valores de maior dimensão de algumas partículas, verifica-se que a partícula maior terá 38,12 μm , em concordância com os valores da curva granulométrica presente na Figura 3.8. Também se pode observar que existe uma grande discrepância entre a dimensão das partículas, isto é, algumas são de grande dimensão e as restantes de reduzida dimensão. Esta observação está de acordo com a granulometria observada no granulómetro, traduzida por uma curva descontínua quase bimodal.

Relativamente aos espectros que foram obtidos na zona Z1 de uma partícula grossa e na zona Z2 de uma partícula fina verifica-se que têm composições diferentes (ver Figura 3.11). Embora não se tenham registados outros espectros, verificou-se esta situação noutros pontos da amostra. Assim pode-se concluir, de uma maneira geral que as partículas de maiores dimensões são siliciosas e as de reduzidas dimensões serão de pasta de cimento hidratada.

4.2.4. GRANULOMETRIA

O CDW moído 48h é ligeiramente mais fino do que o cimento utilizado como se pode constatar pelas Figuras 3.7 e 3.8 no ponto 3.2.2.1, e pelos valores das dimensões características $d(10)$, $d(50)$, $d(90)$ e diâmetro médio (designado por D médio) apresentados na Tabela 4.1. De acordo com a tabela, cerca de 90% das partículas do cimento têm dimensão inferior a 27,95 μm , contudo no CDW moído 90% das partículas possuem um diâmetro menor que 16,34 μm . A diferença entre diâmetros dos materiais é muito acentuada para $d(90)$, enquanto que nas restantes dimensões características a diferença é menos pronunciada.

O fíler utilizado neste trabalho é ligeiramente mais fino que o CDW moído 48h.

Tabela 4. 1 – Dimensões características das amostras de cimento e CDWF

Material	$d(10)^{(1)}$	$d(50)^{(1)}$	$d(90)^{(1)}$	D médio
Cimento	1.22 μm	9.94 μm	27.95 μm	12.57 μm
CDW moído 48h	0.82 μm	4.54 μm	16.34 μm	6.85 μm
Fíler de carbonato de cálcio	0.79 μm	3.05 μm	9.38 μm	4.22 μm

⁽¹⁾ $d(Y)$ é o diâmetro em que Y% das partículas têm o diâmetro inferior a $d(Y)$.

4.2.5. TRABALHABILIDADE

A trabalhabilidade, avaliada pelo espalhamento. No presente trabalho, este parâmetro é ligeiramente maior nas argamassas com substituto parcial de cimento por CDWf. Contudo, as argamassas com substituto parcial de 5% e 10% do cimento obtiveram a mesma trabalhabilidade. Este pequeno aumento é favorável para a manipulação do betão fresco, sendo que se torna desnecessário o uso acrescido de plastificantes e superplastificantes, que muitas vezes são necessários noutros substitutos parciais de cimento. Assim o betão produzido com CDWf como substituto parcial do cimento, poderá ser um betão mais económico pela redução de cimento e aumento da trabalhabilidade. Evidentemente, será necessário verificar estes resultados ao nível de betão.

Na tabela 4.2, a trabalhabilidade representa a média de todos os resultados obtidos nas amassaduras efetuadas em cada ensaio.

Tabela 4. 2 – Resultados obtidos para a trabalhabilidade

Provete	Trabalhabilidade	Desempenho (%)
CTL	233	-
CDWf5	235	1
CDW1f0	235	1

4.2.6. MASSA VOLÚMICA

A determinação da massa volúmica do cimento CEM I 42,5R permitiu constatar que este se encontrava em boas condições, visto que o valor obtido é superior ao valor limite de 3,06 g/cm³. A massa volúmica do cimento utilizado no programa experimental é 3,1 g/cm³ e este resultado vai de encontro ao valor fornecido na ficha técnica do material.

Para os restantes materiais os valores obtidos foram muito semelhantes entre si, sendo o valor do fíler 2,7 g/cm³ e o do CDWf 2,6 g/cm³. Segundo a NP4220, o valor da massa volúmica não deve divergir mais do que 0,20 g/cm³ do que o valor declarado pelo produtor. Contudo, o valor de CDWf não está definido, visto que este material se encontra a ser testado pela primeira vez. Relativamente ao fíler, a massa volúmica fornecida pelo produto está de acordo com o resultado obtido no ensaio.

Tabela 4. 3 - Resultados e valores exigidos para a massa volúmica dos materiais utilizados

Provete	Massa volúmica (g/cm ³)	Massa volúmica exigidos (g/cm ³)
Cimento	3,1	≥3,06
CDWf	2,6	Não definido
Fíler	2,7	2,7 ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Valor recolhido da ficha técnica do material (Consultar Anexo)

4.2.7. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA E DO TEMPO DE PRESA

Nos ensaios de determinação da consistência, a quantidade de água aumentou muito ligeiramente nas pastas com substituto de cimento por CDWf, sendo que quanto mais elevada a percentagem de cimento substituído mais água a pasta requereu, como se pode observar na tabela seguinte.

Tabela 4. 4 - Resultados obtidos nos ensaios de determinação da Consistência normal e do Tempo de presa

Provete	Água (g)	A/C (%)	Consistência normal (mm)	Início de presa (a)	Fim de presa (b)
CTL	142	28	6	3h49	5h24
CDWf5	144	29	6	4h10	6h10
CDWf10	147	29	4	5h03	6h58

O CEM I 42,5 R cumpriu o tempo mínimo para o início de presa previsto na norma NP EN 197-1.

O tempo de início e de fim de presa das pastas com adição são diferentes dos valores obtidos para a pasta de controlo. Pela análise da Tabela 4.4, o início presa das pastas com substituto inicia-se mais tarde em comparação com a pasta de controlo.

Em relação às pastas que contêm CDW, os tempos mínimos são definidos pela norma NP EN 4420. O tempo de início presa do cimento com adição não deve exceder em mais de 2h o tempo da pasta de cimento sem adição. A partir da análise dos valores presentes na Tabela 4.4, concluiu-se que as pastas com adições satisfizeram os requisitos exigidos.

4.2.8. EXPANSIBILIDADE

Os materiais ensaiados não apresentaram sinais de expansibilidade, tanto a pasta de 100% de cimento como as pastas com material substituto sofreram expansões inferiores ao limite recomendado pelas normas NP EN 197-1 e NP EN 4420, respetivamente.

A partir da visualização dos dados da Tabela 4.5, constata-se que a pasta de controlo apresenta uma maior expansibilidade do que as pastas com substituto parcial do cimento, e que a expansão desenvolvida nas pastas com adição é independente da percentagem de substituição do cimento, pois os valores obtidos foram iguais.

Tabela 4. 5 - Valores e desempenho do ensaio para a determinação da expansibilidade

Provete	Média	Desempenho (%)
CTL	2	-
CDWf5	1	50
CDWf10	1	50

4.2.9. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS E ÍNDICE DE ATIVIDADE

A norma NP EN 197-1 estabelece três classes de resistência inicial: classe com normal resistência (indicada pela letra N), classe com elevada resistência (indicada por R) e por fim classe com baixa resistência (representada pela letra L). A presente norma ainda indica os limites para os requisitos mecânicos.

Tabela 4. 6 - Requisitos Mecânicos expressos como valores característicos especificados (NORMA)

Classe de resistência	Resistência à compressão (MPa)			
	Resistência inicial		Resistência de referência	
	Aos 2d	Aos 7d	Aos 28d	
42,5 R	$\geq 20,0$	-	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$

Segundo a NP EN 4220, o índice de atividade indica a influência da pozolana na resistência à compressão do betão. Este índice é expresso em percentagem e calcula-se através da razão entre a resistência à compressão aos 28d da argamassa preparada com pozolana e cimento de referência e a argamassa preparada apenas com o cimento de referência. Para o cálculo deste índice é necessário que as proporções estejam em concordância com a classe de pozolanicidade declarada pelo produtor.

Tabela 4. 7 - Classes de Pozolanicidade e respetivas composições da argamassa

Classes de pozolanicidade	Ligante da argamassa normal	
	Cimento de referência (% em massa)	Pozolana (% em massa)
POZ 90/10	90	10
POZ 85/15	85	15
POZ 80/20	80	20
POZ 75/25	75	25
POZ 70/30	70	30
POZ 65/35	65	35
POZ 60/40	30	40

Tabela 4. 8 - Valores e desempenho da resistência à flexão

Provete	7 d	28d	90d
CTL	6,0	7,1	7,8
Desempenho(%)	-	-	-
CDW5	4,9	6,7	7,5

Desempenho(%)	-20	-5	-4
CDW10	5,1	6,3	7,2
Desempenho(%)	-15	-11	-8

Tabela 4. 9 - Valores e desempenho da resistência à compressão

Provete	7 d	28d	90d
CTL	35,5	46,3	53,4
Desempenho(%)	-	-	-
CDW5	28,5	42,3	51,3
Desempenho(%)	-20	-9	-4
IA_{POZ 95/5}*		91%*	96%*
CDW10	28,4	38,1	46,8
Desempenho(%)	-20	-18	-12
IA_{POZ 90/10}		82%	88%*

* classe/IA não referidos na norma

Apenas o cimento CEM I 42,5 R utilizado no procedimento experimental cumpriu os requisitos mecânicos exigidos pela norma (ver Tabela 4.6), como seria de esperar.

Os resultados presentes na Tabela 4.8 e na Tabela 4.9 demonstram uma redução das resistências, quer à compressão como à flexão, das argamassas onde ocorreu uma substituição parcial do cimento por CDWf. As argamassas de CDWf5 e CDWf10 sofreram perdas inferiores a 20% em relação à argamassa de CTL. De notar que as diferenças de resultados entre os três tipos de provetes, tornam-se menos acentuadas para menores percentagens de substituição e para idades mais avançadas, o que parece indicar que existe alguma ação pozolânica.

Por fim, o provete de CDW5 obteve resultados muito próximos dos valores de CTL aos 28d e 90d, ou seja, a substituição de 5% do cimento não provocou alterações significativas nas resistências à compressão e à flexão quando comparados com os valores de controlo.

Pela análise da tabela 4.7, a classe aplicável ao caso em estudo é POZ 90/10 que corresponde à argamassa de CDWf10. Evidentemente que se poderá supor a existência de uma classe (não legislada) POZ95/5 para CDWf5, utilizando a mesma filosofia.

O índice de atividade (IA) deve ser superior ou igual à percentagem de cimento de referência da classe de pozolanidade correspondente. Porém, pela visualização da Tabela 4.9 verifica-se que aos 28d, o índice de atividade da argamassa de CDWf10 é inferior ao mínimo exigido e aos 90d continuou inferior ao valor desejado, frisando que a diferença do índice de atividade aos 90d em relação ao mínimo exigido é muito reduzida. A argamassa CDWf5 atinge o requisito mínimo exigido aos 90d.

Ghrici et al., realizaram um estudo para determinar as resistências mecânicas à flexão e à compressão em argamassas que sofreram uma substituição parcial do cimento por fíler, seguindo o procedimento descrito na norma EN 196-1, ou seja, o mesmo procedimento aplicado neste trabalho.

Tabela 4. 10 – Resultados desempenho do das resistências mecânicas à flexão obtidos por Ghrici et al.

Provete	Percentagem de cimento substituído	Desempenho
7d	10%	-13%
28d	10%	-12%
90d	10%	-5%

Tabela 4. 11 – Resultados do desempenho das resistências mecânicas à compressão obtidos por Ghrici et al.

Provete	Percentagem de cimento substituído	Desempenho
7d	10%	7%
28d	10%	4%
90d	10%	3%

A partir análise das tabelas anteriores, concluiu-se que as resistências mecânicas à flexão das argamassas com adição de CDWf apresentam um comportamento semelhante às argamassas que contêm fíler na sua constituição. Contudo, para as resistências mecânicas à compressão, o desempenho das mesmas é ligeiramente inferior em comparação com as argamassas que sofreram substituição parcial de cimento por fíler. De salientar, que para uma substituição de 5% de cimento por CDWf o comportamento é particamente semelhante às argamassas com fíler com o aumento da idade.

4.2.10. RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO

Os resultados obtidos, como se pode observar na Tabela 4.12, demonstram um aumento da profundidade de carbonatação das argamassas que contêm CDWf em relação ao CTL, verificando-se que a profundidade aumenta com a percentagem de material substituído.

Tabela 4. 12 - Resultados e desempenho do ensaio da resistência à carbonatação

Provete	H médio (cm)	Desempenho (%)
CTL	0,6	-
CDWf5	0,7	-10
CDWf10	0,8	-29

A substituição de cimento por CDWf implica uma menor quantidade de Ca(OH)_2 , conduzindo a uma maior facilidade de carbonatação se a rede porosa fosse idêntica. Porém, a rede porosa é influenciada pela granulometria do material substituto, como já foi referido no ponto 4.2.3., que é ligeiramente mais fino que o cimento, o que muito provavelmente induzirá a uma rede porosa ligeiramente mais apertada, que dificultará a entrada de CO_2 (efeito fíler). Além disto, o material substituto estará mais ou menos carbonatado uma vez que resulta de betão antigo. No caso de se encontrar com um grau de carbonatação menor, poderá oferecer alguma resistência a progressão da carbonatação. No caso de estar mais carbonatado, oferecerá menos resistência à progressão da carbonatação promovendo uma carbonatação mais rápida.

Em suma, esta última contribuição e a redução da quantidade de Ca(OH)_2 parecem suplantam o facto de a rede porosa das argamassas com substituição parcial do cimento dificultar a entrada de CO_2 .

4.2.11. PENETRAÇÃO ACELERADA POR CLORETOS

A penetração de cloretos facilita a corrosão no aço do betão armado. O ensaio escolhido permite classificar os betões no que se refere à penetração de cloretos em função do coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário (calculado segundo a especificação LNEC E- 463), como se pode visualizar na seguinte tabela:

Tabela 4. 13 - Relação entre a classe de resistência do betão e o coeficiente de difusão (Instituto Português da Qualidade, 1993)

Coeficiente de difusão em estado não estacionário, D_{ns}	Classe de resistência à penetração de cloretos
$D_{ns} \geq 15 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Baixa
$10 \cdot 10^{-12} < D_{ns} < 15 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Moderada
$5 \cdot 10^{-12} < D_{ns} < 10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Elevada
$2,5 \cdot 10^{-12} < D_{ns} < 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Muito Elevada
$D_{ns} \leq 2,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Extremamente Elevada

Como neste ensaio se utilizam argamassas, supõem-se que os limites das classes obtidos serão mais elevados, uma vez que esta classificação é referente ao betão. Isto deve-se ao facto da argamassa

produzida para o ensaio não conter agregados grossos, que dificultariam a circulação de cloretos na rede porosa.

Tabela 4. 14 - Resultados do Dns obtidos no ensaio

Provete	Dnsmédio (10^{-12} m ² /s)	Desvio padrão	Desempenho (%)	Classe de resistência à penetração de cloretos
CTL	13,94	0,3	-	Moderada
CDWf5	12,63	1,3	9	Moderada
CDWf10	13,66	0,7	2	Moderada

As argamassas com substituto parcial de cimento por CDWf demonstraram um comportamento semelhante entre si e muito ligeiramente favorável em comparação com a argamassa de CTL.

Tendo menos cimento do que a argamassa de controlo e supondo as redes porosas semelhantes, seria expectável que as argamassas contendo CDWf (não pozolânico) apresentassem uma maior permeabilidade aos cloretos uma vez que menos iões cloretos ficariam ligados durante o percurso pela rede porosa. No entanto verifica-se uma redução, embora ligeira, da permeabilidade pelo que poderá supor-se que o CDWf promove ligações de iões cloreto á sua passagem fazendo diminuir a permeabilidade.

De facto é possível também que no processo de permeabilidade aos cloretos alguns destes pequenos iões tenham ficado retidos quimicamente por compostos dos CDWf como já se verificou em trabalhos anteriores com substituição de granito moído. A presença de cloroaluminatos após o ensaio de penetração de cloretos na argamassa contendo substituição parcial do cimento por pó de granito muito moído, sugeriu que a alumina presente no pó de granito tenha reagido com os cloretos penetrantes, fixando-os e em consequência tenha levado à redução do ingresso de cloretos e portanto à diminuição dos coeficientes de difusão observados (Ramos *et al.*, 2013).

O Ghrici et al. determinaram o fator de permeabilidade de iões de cloretos segundo a ASTM C-1202, concluindo que aos 90 dias de idade para uma substituição de 15% do cimento pelo fíler conduziu a um aumento de 135% do fator de permeabilidade em relação à argamassa de controlo.

O CDWf utilizado neste trabalho obteve um melhor desempenho do que o material fíler, para o parâmetro em análise. Sendo que as argamassas com substituto de CDWf obtiveram resultados muito semelhantes à argamassa de controlo. As argamassas com aditivo em estudo sofreram uma diminuição do coeficiente de difusão de aproximadamente 9% e 2% para uma substituição de 5% e 10% de cimento, respetivamente.

De salientar que os coeficientes dos ensaios anteriormente descritos são distintos, contudo permite concluir as argamassas com CDWf apresentam uma resistência maior à penetração de cloretos.

4.2.12. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Segundo Coutinho, o parâmetro de absorção por capilaridade no betão pode ser classificado conforme os valores presentes na Tabela 4.12. Contudo, como este trabalho é referente a argamassas, poder-se-á prever que os limites exibidos serão mais elevados para as argamassas. Provavelmente, a absorção será

mais intensa numa argamassa do que num betão semelhante, visto que não existe agregado grosso na rede porosa para dificultar o percurso da água.

Tabela 4. 15 - Limites do coeficiente de absorção (Bertolini *et al.*, 2004; Browne, 1991)

Qualidade do betão	Coeficiente de absorção
Baixa	$S > 0,2 \text{ mg}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$
Média	$0,1 \text{ mg}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{0.5}) < S < 0,2 \text{ mg}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$
Elevada	$S < 0,1 \text{ mg}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$

Porém a análise destes resultados não será realizada pelos motivos atrás referidos.

4.2.13. REACÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA (ASR)

O objetivo deste ensaio é determinar a reatividade das adições, assim foi considerada uma areia que se sabia ser reativa.

Segundo a especificação E-461 do LNEC, para averiguar a reatividade de agregados se a expansão for inferior a 0.10% ao fim de 14 dias o agregado é da Classe I (agregado não reativo), entre 0.10% e 0.20% da Classe II (agregado potencialmente reativo) e superior a 0.20% Classe III (agregado potencialmente reativo), sendo os da classe III mais reativos do que os da classe II

4.2.13.1. ASR EM ARGAMASSAS COM CDW

O CDWf utilizado como substituto parcial do cimento, obteve expansões de ASR significativamente menores do que a argamassa de CTL, sendo que a expansão diminuiu com o aumento da percentagem de cimento substituído. Esta redução pode ser justificada pelo facto do material substituto ser ‘cimento antigo’, onde a álcalis existente na amostra provavelmente já reagiu, tornando-se inofensiva para a argamassa utilizada no ensaio, ou seja, a substituição leva a uma redução da álcalis potencialmente reativa na argamassa devido a uma menor percentagem de cimento novo (que é provavelmente o único fornecedor de alcalis para que ocorra a ASR).

Outro fator, que possivelmente contribuiu para estes resultados, foi a alteração da rede porosa, onde o material CDWf é mais fino que o cimento, conduzindo a uma rede porosa mais apertada, o que dificultará a ASR.

Tabela 4. 16 - Expansões médias aos 14 dias e 26 dias e o respetivo desempenho

Provete	$e_{\text{médio 14 dias}}$	Desempenho (%)	$e_{\text{médio 26 dias}}$	Desempenho (%)
CTL	0,08405	-	0,18270	-
CDWf5	0,0752	11	0,1566	14
CDWf10	0,0639	24	0,1260	31

4.2.13.2. ASR EM ARGAMASSA COM FÍLER

Segundo estudos elaborados por Chen e Yang, a adição de fíler de calcário como substituto parcial do cimento provoca uma (ligeira) redução da expansão provocada pela ASR. De facto para argamassas com uma razão água cimento 0,47, as expansões observadas foram de 0,24%, 0,23% e 0,21% para 0%, 5% e 10% de substituição de cimento por fíler calcário, respetivamente. Segundo aqueles autores a substituição de cimento por fíler reduziu a quantidade de álcalis na argamassa, visto que ocorreu uma redução da quantidade de cimento (uma das principais fontes de álcalis) e o fíler utilizado contém uma quantidade muito reduzida de álcalis (Chen e Yang, [s.d.]).

Segundo Pedersen, o fíler calcário não tem qualquer efeito na expansão ASR calculada pelo método da barra de argamassa. (Performance Assessment For Alkali Silica Reaction, [s.d.])

Tabela 4. 17 - Expansões médias aos 14 dias e 26 dias e o respetivo desempenho do fíler

Provete	$e_{\text{médio 14 dias}}$	Desempenho (%)	$e_{\text{médio 26 dias}}$	Desempenho (%)
CTL	0,1096	-	0,2073	-
fíler5	0,1038	5	0,2015	4
fíler10	0,1144	-4	0,2257	-9

Analisando os resultados da Tabela 4.17 para os 14 dias as expansões foram praticamente idênticas e para os 26 dias verificou-se um ligeiro aumento para os 10% de fíler. Portanto, poder-se-á concluir que o fíler não terá grande influência nos resultados da expansão ASR confirmando a teoria de Pederson.

Porém, o objetivo da realização deste ensaio era compreender melhor a causa dos resultados tão favoráveis enunciados na Tabela 4.17. Na realidade embora não se tenham observado grandes diferenças aos 14 dias, a redução da expansão foi notória aos 26 dias sobretudo para 10% de substituição do cimento por CDWf.

O ensaio de expansão ASR realizado nas argamassas com substituto de cimento por fíler (este contém uma granulometria semelhante ao CDWf) e concluído, de um modo geral, que o fíler não terá grande influência nos resultados de expansão. Isto poderá querer dizer que a redução de expansão observada nos ensaios ASR com CDWf não será devido à diminuição da quantidade de cimento e, que provavelmente haverá um processo químico envolvido. Isto é, o CDWf promoverá a redução da expansão provocada por ASR. De facto outro trabalho realizado mas com pó de granito demonstrou que este resíduo não pozolânico reduz as expansões provocadas por ASR avaliadas com o método da barra de argamassa (Ramos et al., 2013).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., & Polder, R. (2004). *Corrosion of Steel in Concrete. Prevention, Diagnosis, Repair*.

Browne, R. D. (1991). *Field Investigations: Site & Laboratory Tests: Maintenance, Repair and Rehabilitation of Concrete Structures*.

- Chen, C., & Yang, W. (n.d.). Mitigation of Alkali-Silica Reaction in Mortar with Limestone Addition and Carbonation, *I*.
- Ghrici, M., Kenai, S., & Said-Mansour, M. (2007). Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement and Concrete Composites*. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.04.009>
- Instituto Português da Qualidade. (1993). *Betão. Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade ENV 206*.
- Instituto Português da Qualidade. (2010). Pozolanas para betão, argamassas e caldas Definições, requisitos e verificação da conformidade NP EN 4220.
- Instituto Português da Qualidade. (2012). Cimento Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes NP EN 197-1.
- LNEC. (2004). Betões. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário E 463.
- LNEC. (2007). Betões. Metodologias para prevenir reacções expansivas internas E 461.
- Performance Assessment For Alkali Silica Reaction. (n.d.). Definitions. Retrieved from <http://homepage.tudelft.nl/n89v3/Page3.html>
- Ramos, T., Matos, A. M., Schmidt, B., Rio, J., & Sousa-Coutinho, J. (2013). Granitic quarry sludge waste in mortar: Effect on strength and durability. *Construction and Building Materials*, 47, 1001–1009. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.098>

5

CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentam-se as conclusões gerais e sugerem-se desenvolvimentos futuros.

5.2. CONCLUSÕES GERAIS

Para a análise final de resultados são apresentados o desempenho dos provetes que sofreram substituição parcial do cimento por CDWf na Tabela 5. 1, e também foram dispostos num gráfico na Figura 5.1 para permitir uma melhor percepção.

Pode-se concluir que:

- ✓ O CDWf utilizado como substituto permitiu uma ligeira melhoria da trabalhabilidade, sem ser necessário o uso de qualquer plastificante. Tal característica pode não acontecer quando se substitui agregados naturais por agregados reciclados no betão, como referido por outros autores;
- ✓ No que se refere à resistência mecânica à compressão, o uso de CDWf como substituto parcial de cimento nas argamassas provocou uma diminuição da resistência em relação à argamassa de CTL. Porém a perda da resistência diminuiu com o aumento da idade dos provetes e com a menor percentagem de cimento substituído. De salientar, que para uma substituição de 5% do cimento obteve-se uma perda de resistência aos 90d de apenas 4%. Esta tendência vai de encontro ao verificado por outros autores;
- ✓ Relativamente à carbonatação, as argamassas com CDWf sofreram um ligeiro aumento da profundidade de carbonatação comparativamente à argamassa de controlo;
- ✓ No que concerne ao ataque por cloretos, as argamassas com substituto parcial de cimento por CDWf obtiveram um desempenho positivo em relação à argamassa de CTL;
- ✓ A expansão provocada por ASR foi inferior nas argamassas que incorporam CDWf;

Tabela 5. 1 - Resultados da maioria dos ensaios realizados neste trabalho

Ensaio		CTL	CDWf5	CDWf10	Normas
Expansibilidade		2	1	1	NP EN 4420 NP EN 197-1
Desempenho (%)		-	50	50	
Respeita as normas		OK	OK	OK	
Tempo de presa		3h49	4h10	5h03	NP EN 4420
Respeita as normas		OK	OK	OK	NP EN 197-1
Resistências mecânicas à compressão	7 d (MPa)	35,5	28,5	28,4	NP EN 197-1 NP 4220
	Desempenho (%)	-	-19,5	-19,9	
	28d (Mpa)	46,3	42,3	38,1	
	Desempenho (%)	-	-8,7	-17,9	
	Respeita as normas	OK	KO	KO	
	90d (Mpa)	53,4	51,3	46,8	
	Desempenho (%)	-	-4	-12,4	
Índice de atividade	R28	-	91%	96%	NP4220
	Respeita as normas	-	OK	OK	
	R90	-	82%	88%	
Carbonatação		0,6	0,7	0,8	LNEC E-391
Desempenho (%)		-	-10	-29,1	
Penetração dos cloretos		13,94	12,63	13,66	LNEC E-463
($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)					
Desempenho (%)		-	9,4	2	ENV 206
Respeita as normas		OK	OK	OK	
ASR (aos 14d)		0,08	0,08	0,06	LNEC E- 461 ASTM C 1260
Desempenho (%)		-	10,5	24,0	
Respeita as normas		OK	OK	OK	

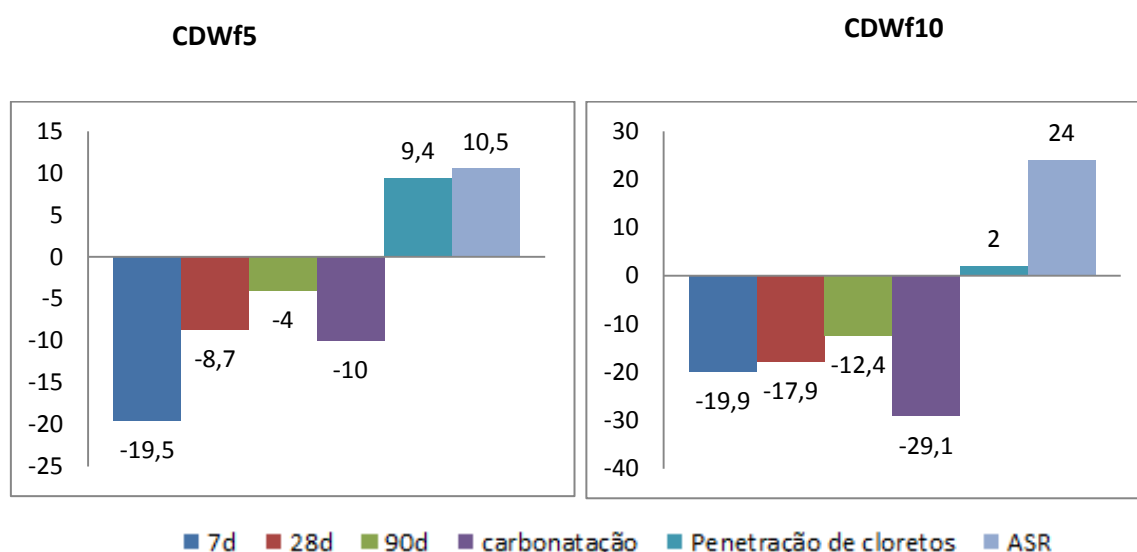


Figura 5. 1 - Comparação geral de resultados de CDWf

Assim, poder-se-á concluir que este resíduo (em particular) poderá substituir parcialmente o cimento Portland em pequenas percentagens levando a uma perda marginal de resistência mas com aumento de durabilidade. De qualquer modo, será sempre importante, para se poder generalizar, fazer mais investigação abrangendo outras fontes de CDW e depois passar para o estudo a nível do betão. Em suma este trabalho abre uma perspectiva em termos de sustentabilidade na construção.

5.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Em seguida destacam-se algumas das questões mais importantes a abordar em desenvolvimentos futuros na investigação de CDWf:

- ✓ Determinar a composição química de CDWf;
- ✓ Realizar o mesmo programa experimental para diferentes tipos de resíduos de construção e demolição com o intuito de determinar a influência de diferentes composições sob os parâmetros em estudo;
- ✓ Realizar o mesmo programa para diferentes percentagens das testadas neste estudo;
- ✓ Executar novamente o ensaio de carbonatação com o intuito de analisar a evolução da carbonatação no tempo;
- ✓ Determinar os parâmetros relativos à expansão e difusão de cloretos para uma maior percentagem de cimento substituído do que a testado neste trabalho;
- ✓ Realizar um programa experimental de ensaios equivalente para o betão, permitindo analisar o comportamento do betão quando sujeito a uma substituição parcial do cimento;
- ✓ Elaborar um programa de ensaio mais vasto que permita a determinação da influência dos CDWf na fluência, retração do betão, da durabilidade, entre outras.

ANEXOS

- Anexo 1 Ficha Técnica do Cimento Cem I 42,5R
- Anexo 2 Ficha Técnica do Fíler de carbonato de cálcio
- Anexo 3 Distribuição Granulométrica dos CDWf moídos 8h
- Anexo 4 Distribuição Granulométrica dos CDWf moídos 13h
- Anexo 5 Distribuição Granulométrica dos CDWf moídos 24h
- Anexo 6 Distribuição Granulométrica dos CDWf moídos 48h
- Anexo 7 Trabalhabilidades das argamassas realizadas
- Anexo 8 Resistências mecânicas
- Anexo 9 Resistência à carbonatação
- Anexo 10 Penetração acelerada por cloretos
- Anexo 11 Absorção de água por capilaridade
- Anexo 12 Reação Álcalis-Sílica com CDW
- Anexo 13 Reação Álcalis-Sílica com fíler



RESULTADOS DO AUTOCONTROLO
AUTOCONTROL RESULTS / RÉSULTATS DE L'AUTO-CONTÔLE
VALORES MÉDIOS
AVERAGE RESULTS / RÉSULTATS MOYENNE

REFERÊNCIA Cimento Portland - EN 197-1 CEM I 42,5 R
REFERENCE Portland Cement / Ciment Portland

BOLETIM Nº ACM 010/2014
REPORT N.º RAPPORT N.

FÁBRICA Macela-Liz
PLANT / USINE

DATA 16-04-2014
DATE

MÊS Fevereiro 2014
MONTH / MOIS February / Février

ENSAIOS MECÂNICOS

MECHANICAL TESTS / ESSAIS MÉCANIQUES (NF EN 196-1)

IDADE AGE	Resistência à Flexão (MPa) Tensile Strength Résistance à la Flexion		Resistência à Compressão (MPa) Compressive Strength Résistance à la Compression	
	MÊS MONTH / MOIS	ANO YEAR / AN	MÊS MONTH / MOIS	ANO YEAR / AN
2 dias Days / jours	5,8	5,9	32,9	32,4
7 dias Days / jours	7,7	7,8	47,4	47,6
28 dias Days / jours	9,1	9,0	58,7	58,1

ENSAIOS FÍSICOS

PHYSICAL TESTS / ESSAIS PHYSIQUES

	MÊS MONTH / MOIS	ANO YEAR / AN
Peso Específico (g/cm³) Specific weight / Masse volumique	3,12	3,12
Resíduo de Penetração (%) Sieve Residue / Résidu du Tamisage (NF EN 196-6)	45 µm 32 µm	3,57 10,05
Superfície Específica de Blaine (cm²/g) Blaine Spec. Surface / Surface spécifique Blaine (NF EN 196-6)	4040	4066
Água na Pasta Normal (%) Water demand / Eau de Gâchage (NF EN 196-3)	28,8	28,9
Tempo de Presa (min) Setting Time / Temps de Prise (NF EN 196-3)	Início Initial / Début Fim Final / Fin	165 186 223 257
Expansibilidade (mm) Soundness / Expansion (NF EN 196-3)	0,97	0,88
Índice de Reflectância (0 a 100) Reflection (White-ness) / Index de réflectance		

INFORMAÇÃO ADICIONAL

ADDITIONAL INFORMATION / INFORMATION SUPPLÉMENTAIRE

--

ANÁLISE QUÍMICA

CHEMICAL ANALYSIS / ANALYSES CHIMIQUES

	MÊS MONTH / MOIS	ANO YEAR / AN
Perda ao Fogo (%) Loss on Ignition / Perte au Feu	-	1,97 2,20
Resíduo Insolúvel (%) Residue Insoluble / Résidu insoluble	-	1,25 1,30
Óxido de Silício (%) Silicon Dioxide / Oxyde de Silicium	SiO ₂	20,07 19,19
Óxido de Alumínio (%) Aluminium Oxide / Oxyde d'Aluminium	Al ₂ O ₃	4,36 4,46
Óxido de Ferro (%) Ferro Oxide / Oxyde de Fer	Fe ₂ O ₃	3,30 3,40
Óxido de Cálcio (%) Calcium Oxide / Oxyde de Calcium	CaO	63,87 63,96
Óxido de Magnésio (%) Magnesium Oxide / Oxyde de Magnésium	MgO	1,91 1,86
Sulfatos (%) Sulfates / Sulfates	SO ₃	3,21 3,24
Óxido de Potássio (%) Potassium Oxide / Oxyde de Potassium	K ₂ O	0,79 0,89
Óxido de Sódio (%) Sodium Oxide / Oxyde de Sodium	Na ₂ O	0,21 0,22
Clorídeos (%) Chlorides / Chlorures (NF EN 196-2)	Cl	0,08 0,06
Cal Livre (%) Free Lime / Chaux Libre		
Índice de Saturação em Cal Lime Saturation Factor / Degré de Chaux		
Índice Silíceo Silica Ratio / Indice Siliceux		
Índice Alumínico Alumina-Iron Ratio / Indice Alumineux		

COMPOSIÇÃO POTENCIAL DE BOGUE

BOGUE'S COMPOSITION / COMPOSITION POTENTIAL DE BOGUE

Silicato Tricálcico (%) Tricalcium Silicate / Silicate Tricalcique	C ₃ S	56,58 (pot.) 56,20 (pot.)
Silicato Bicálcico (%) Bicalcium Silicate / Silicate Bicalcique	C ₂ S	17,10 14,70
Aluminato Tricálcico (%) Tricalcium Aluminate / Aluminate Tricalcique	C ₃ A	
Ferro-aluminato Tetracálcico (%) Tetracalcium Ferrite / Ferrous Tetracalcium Ferrite	C ₄ AF	

APROVADO

APPROVED / APPRÔUVÉ

SPN

ANO / YEAR / AN: Últimos 12 meses / Last 12 months / Dernier 12 mois.
NOTA / NOTE: Os parâmetros são determinados por métodos internos com excepção dos que indicam a (norma aplicável). The parameters are determined by internal methods, except when a (standard) is indicated. Les paramètres sont déterminés par méthodes internes, except ceux que indiquent la (norme applicable).



RESULTADOS DO AUTOCONTROLO
AUTOCONTROL RESULTS | RESULTATS DE L'AUTOCONTROL
VALORES MÉDIOS
AVERAGE RESULTS | RESULTATS MOYENS

REFERÊNCIA Cimento Portland - EN 197-1 CEM I 42,5 R
REFERENCE Portland Cement | Ciment Portland

FÁBRICA Maceira-Liz
PLANT | USINE

MÊS Fevereiro 2015
MONTH | MOIS February | Février

BOLETEM Nº ACQ-0000010
REPORT N.º | RAPPORT N.º

DATA 23-04-2016
DATE

ENSAIOS MECÂNICOS

MECHANICAL TESTS | ESSAIS MÉCANIQUES (NF EN 196-1)

IDADE AGE	Resistência à Flexão (MPa) Tension Strength Résistance à la Flexion		Resistência à Compressão (MPa) Compression Strength Résistance à la Compression	
	MÊS MONTH MOIS	ANO YEAR AN	MÊS MONTH MOIS	ANO YEAR AN
2 dias days jours	5,7	5,9	31,2	32,6
7 dias days jours	7,6	7,9	47,2	47,3
28 dias days jours	9,0	9,0	57,5	57,8

ENSAIOS FÍSICOS

PHYSICAL TESTS | ESSAIS PHYSIQUES

		MÊS MONTH MOIS	ANO YEAR AN
Peso Específico (g/cm³) Specific weight Masse volumique		3,13	3,13
Resíduo de Penetração (%) Sieve Residue Résidu de Tamisage (NF EN 196-4)	45 µm	3,46	3,40
	32 µm		8,81
Superfície Específica de Blaine (cm²/g) Blaine Surf. Surface spécifique Blaine (NF EN 196-4)		3829	4080
Água na Pasta Normal (%) Water demand Eau de Gâchage (NF EN 196-3)		28,2	28,9
Tempo de Presa (min) Setting Time Temps de Prise (NF EN 196-3)	Início Initial Début	197	176
	Fim Final Fin	292	249
Expansibilidade (mm) Soundness Expansion (NF EN 196-3)		1,00	1,00
Índice de Reflectância (0 a 100) Reflection (Whiteness) Index de reflectance			

INFORMAÇÃO ADICIONAL

ADDITIONAL INFORMATION | INFORMATION SUPPLÉMENTAIRE

ANÁLISE QUÍMICA

CHEMICAL ANALYSIS | ANALYSES CHIMIQUES

		MÊS MONTH MOIS	ANO YEAR AN
Perda ao Fogo (%) Loss on Ignition Perte au Feu		2,78	2,46
Resíduo Insolúvel (%) Insoluble Residue Résidu Insoluble		0,34	1,29
Óxido de Silício (%) Silicon Oxide Oxyde de Silicium	SiO ₂	19,13	20,03
Óxido de Alumínio (%) Aluminium Oxide Oxyde de Aluminium	Al ₂ O ₃	4,12	4,36
Óxido de Ferro (%) Ferro Oxide Oxyde de Fer	Fe ₂ O ₃	3,33	3,41
Óxido de Cálcio (%) Calcium Oxide Oxyde de Calcium	CaO	62,63	62,84
Óxido de Magnésio (%) Magnesium Oxide Oxyde de Magnesium	MgO	2,16	1,83
Sulfatos (%) Sulfates Sulfates	SO ₃	3,17	3,19
Óxido de Potássio (%) Potassium Oxide Oxyde de Potassium	K ₂ O	0,74	0,78
Óxido de Sódio (%) Sodium Oxide Oxyde de Sodium	Na ₂ O	0,21	0,20
Cloreto (%) Chloride Chlorures (NF EN 196-2)	Cl	0,07	0,08
Cal Livre (%) Free Lime Chaux Libre			
Índice de Saturação em Cal Lime Saturation Factor Dépot de Chaux			
Índice Silíceo Silica Ratio Indice Siliceux			
Índice Aluminoso Alumina-Iron Ratio Indice Alumineux			

COMPOSIÇÃO POTENCIAL DE BOQUE

BOGUE'S COMPOSITION | COMPOSITION POTENCIAL DE BOGUE

Silicato Tricálcico (%) Tricalcium Silicate Silicate Tricalcique	C ₂ S	58,7 (max)	57,2 (min)
Silicato Bicálcico (%) Dicalcium Silicate Silicate Bicalcique	C ₂ S	13,3	16,3
Aluminato Tricálcico (%) Tricalcium Aluminate Aluminate Tricalcique	C ₃ A		
Ferro-aluminato Tetracálcico (%) Tetracalcium Aluminate Ferroaluminate Tetracalcique	C ₄ AF		

APROVADO

APPROVED | APPROUVÉ

ANO | YEAR | AN: Últimos 12 meses. Last 12 months. Dernier 12 mois.
NOTA (NOTE): Os parâmetros são determinados por métodos internos com excepção dos que indicam
a [muito aplicados]. The parameters are determined by internal methods, except when a [blanket] is
indicated. Les paramètres sont déterminés par méthodes internes, except leurs que indique la [forme
appliquée].

Homologado por: GD&E

Pág. 1/1
PD-08-1206



Betocarb[®] HP - OU

CENTRO DE PRODUÇÃO

SOURE, Portugal (certificado ISO 9001)

BREVE DESCRIÇÃO DO PRODUTO

Filer de carbonato de cálcio seleccionado para betões hidráulicos e filer para betões hidráulicos de altas performances. Produto especialmente adaptado para betão branco.

Em cumprimento com os requisitos normativos:

- Marcação CE: EN 12620 e EN 13139.

- Especificação LNEC E 466-2005.

ANÁLISE QUÍMICA DA MATÉRIA PRIMA ⁽¹⁾

Carbonato de cálcio	> 98	%
Carbonatos totais	> 98	%
Teor de cloretos	<0,001	%
Sulfatos solúveis em ácido	<0,05	%
Teor total de enxofre	<0,04	%
Carbono orgânico total	< 0,2	%
Qualidade dos finos	0,5	g kg ⁻¹
Teor de álcalis	< 0,06	%
Sílica total	< 0,5	%
Reactividade álcalis-sílica	NR, classe I	

DADOS ESPECÍFICOS DO PRODUTO ⁽¹⁾

Granulometria:		
Partículas < 2 mm	100	%
Partículas < 0,125 mm	99	%
Partículas < 0,063 mm	92	%
Superfície específica de Blaine	5400	cm ² g ⁻¹
Brancura CIE L*	94	
Teor de humidade <i>ex works</i>	0,1	%

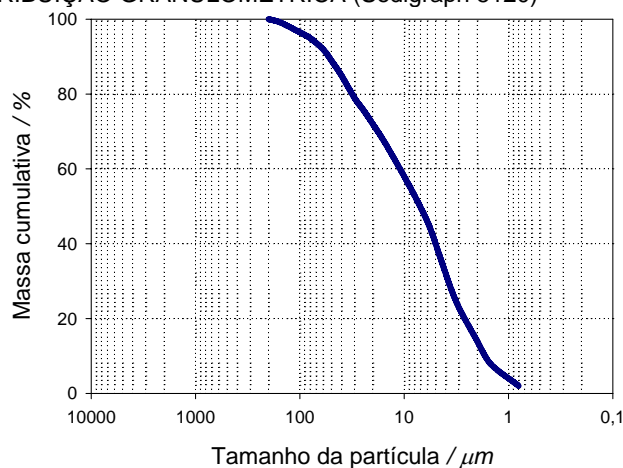
DADOS GERAIS DO PRODUTO

Massa volúmica	2,7	g cm ⁻³
Densidade aparente (OMYA LTM 001)	0,9	g cm ⁻³

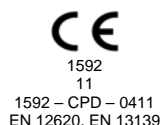
APLICAÇÕES PRINCIPAIS

Betão branco

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA (Sedigraph 5120)



EMBALAGEM
- GRANEL



(1) - os dados apresentados são apenas indicativos.

A informação contida nesta Ficha Técnica diz respeito apenas ao material específico aqui referido e não se refere à utilização em combinação com qualquer outro material ou em qualquer processo. A informação aqui fornecida baseia-se em especificações técnicas que a Omya considera fiáveis, não fazendo a Omya qualquer declaração nem dando qualquer garantia relativamente à integridade ou precisão da mesma e não assumindo a Omya qualquer responsabilidade resultante da sua utilização ou relativa a quaisquer reivindicações, perdas ou danos a terceiros. Os receptores desta informação terão que exercer a sua própria capacidade de decisão relativamente à adequabilidade da sua utilização e é da responsabilidade do utilizador determinar a adequabilidade do material (incluindo a respectiva segurança) para um determinado fim antes da sua utilização.

edição : 13/09/2011
PRODINFO : PTOU
versão : 001



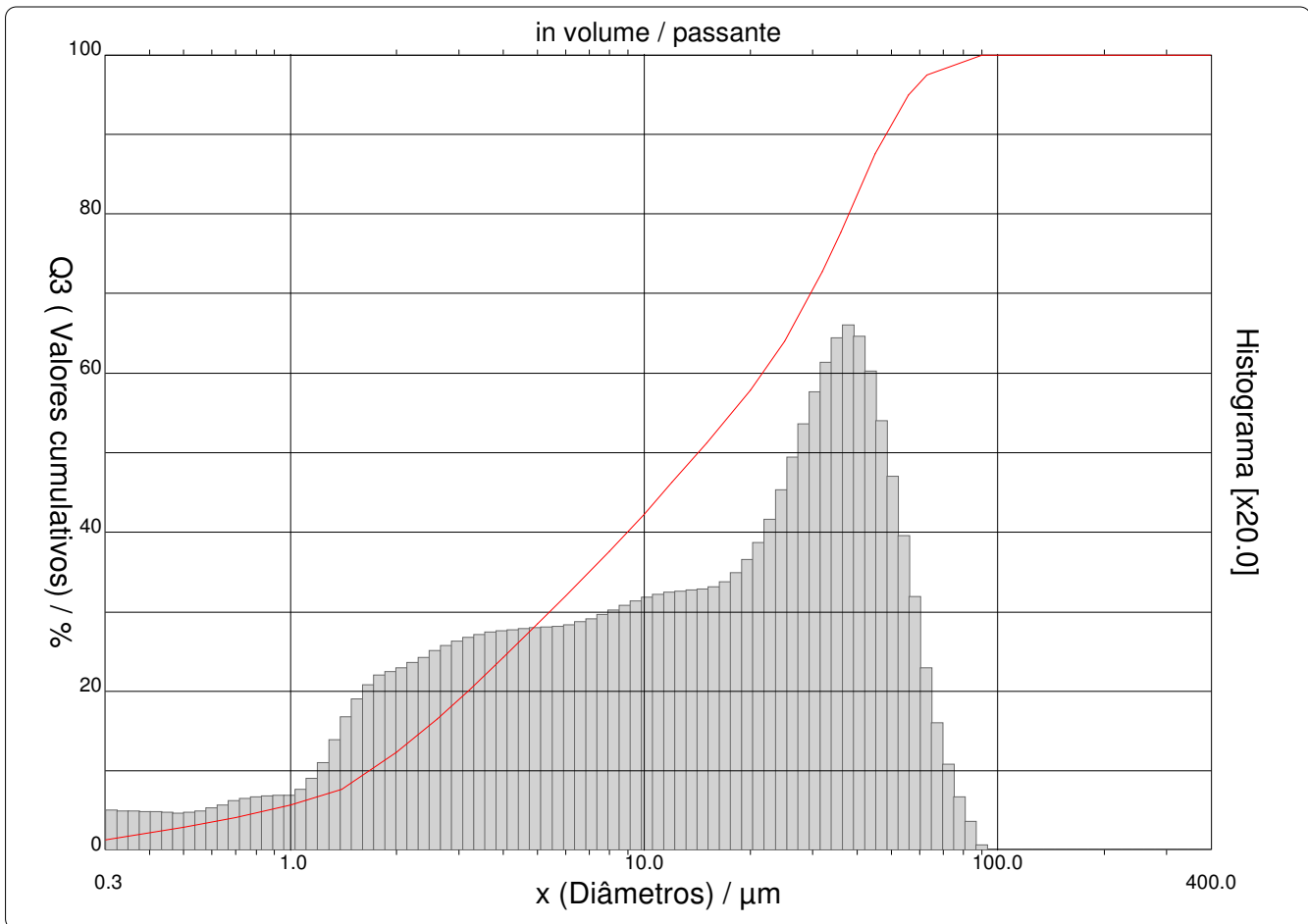
DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 920 Líquido

Faixa : 0.30 μm - 400.00 μm / 30 Classes

Ref da amostra : CDWF 8h
Type produit : Residuo de cimento
Client : TI 06/15
Comentários :
Líquido : Água/Etanol 96
Agente dispersante :
Operador : Gil
Empresa : LEMC
Localização :
Data : 11-02-2015 Hora : 10:48:55
Índice med. : 818 (798)
Database name : Granulog

Ultrasom : 60 s
Obscuration : 15 %
Diâmetro a 10% : 1.67 μm
Diâmetro a 50% : 14.22 μm
Diâmetro a 90% : 48.40 μm
Diâmetro médio : 20.68 μm
Fraunhofer
Densidade/Fator : -----
Superfície específica : -----
Diluição automática : Não / Não
Medida./Limp. : 60s/60s/4
SOP name : FEUP





DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 920 Líquido

Faixa : 0.30 μm - 400.00 μm / 30 Classes

Ref da amostra : CDWF 8h
Type produit : Residuo de cimento
Client : TI 06/15
Comentários :
Líquido : Água/Etanol 96
Agente dispersante :
Operador : Gil
Empresa : LEMC
Localização :
Data : 11-02-2015 Hora : 10:48:55
Índice med. : 818 (798)
Database name : Granulog

Ultrassom : 60 s
Obscuration : 15 %
Diâmetro a 10% : 1.67 μm
Diâmetro a 50% : 14.22 μm
Diâmetro a 90% : 48.40 μm
Diâmetro médio : 20.68 μm
Fraunhofer
Densidade/Fator : -----
Superfície específica : -----
Diluição automática : Não / Não
Medida./Limp. : 60s/60s/4
SOP name : FEUP

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.30	0.50	0.70	1.00	1.40	2.00	2.60	3.20	4.00	5.00
Q3	1.31	2.98	4.11	5.69	7.70	12.37	16.54	20.17	24.28	28.49
q3	0.37	0.74	0.76	1.00	1.36	2.97	3.61	3.97	4.18	4.28

x	6.00	8.00	10.00	12.00	15.00	20.00	25.00	32.00	36.00	45.00
Q3	31.97	37.61	42.26	46.23	51.19	57.84	63.94	72.74	77.72	87.55
q3	4.33	4.45	4.73	4.94	5.04	5.24	6.20	8.09	9.59	9.99

x	56.00	63.00	90.00	112.0	140.0	180.0	224.0	280.0	315.0	400.0
Q3	94.90	97.46	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	7.62	4.93	1.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / μm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution



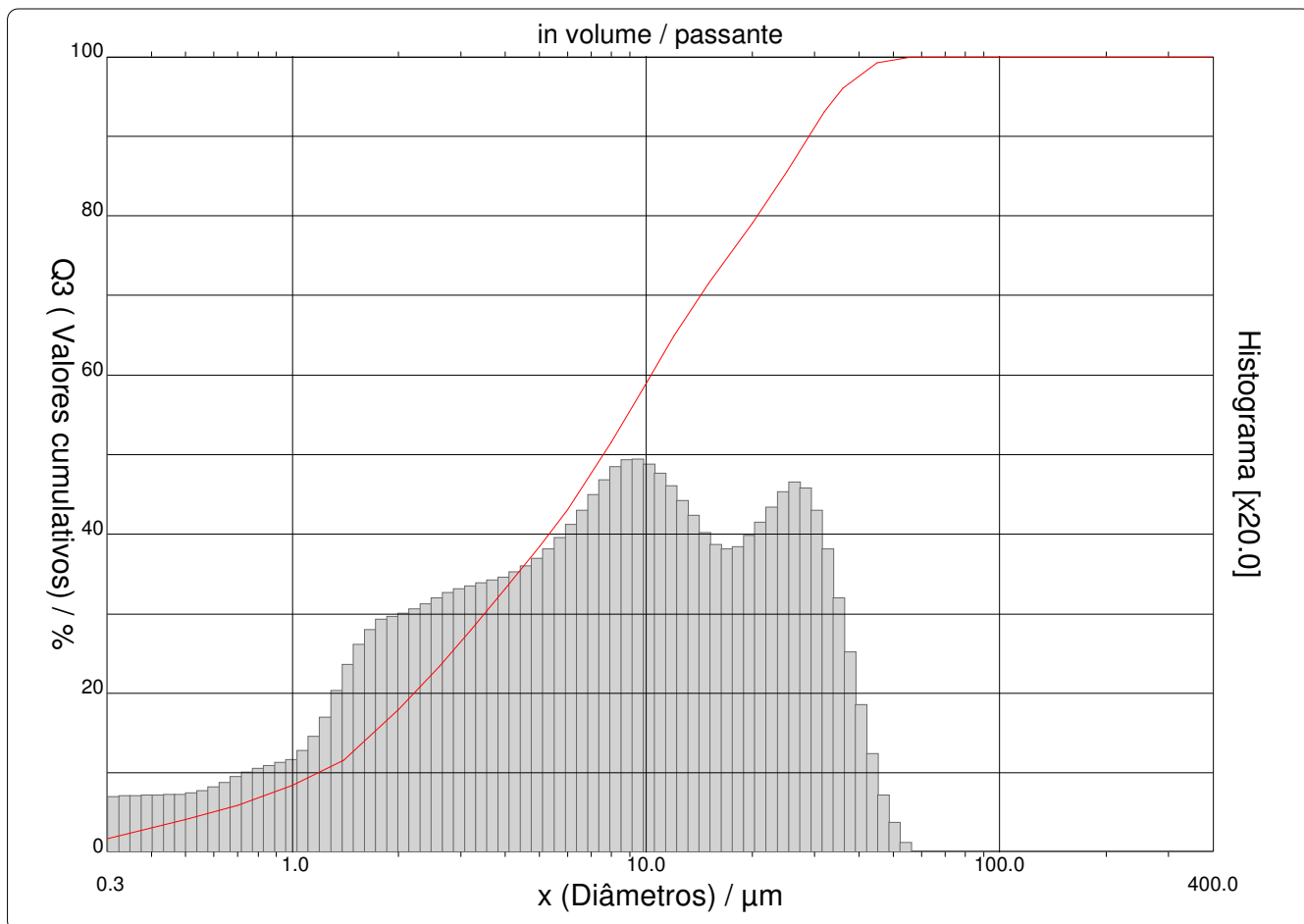
DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 920 Líquido

Faixa : 0.30 μm - 400.00 μm / 30 Classes

Ref da amostra : CDWF 13h
Type produit : Residuo de cimento
Client : TI 06/15
Comentários :
Líquido :
Agente dispersante :
Operador : Gil
Empresa : LEMC
Localização :
Data : 11-02-2015 Hora : 17:42:50
Índice med. : 817 (804)
Database name : Granulog

Ultrasom : 60 s
Obscuration : 14 %
Diâmetro a 10% : 1.18 μm
Diâmetro a 50% : 7.58 μm
Diâmetro a 90% : 28.95 μm
Diâmetro médio : 11.55 μm
Fraunhofer :
Densidade/Fator : -----
Superfície específica : -----
Diluição automática : Não / Não
Medida./Limp. : 60s/60s/4
SOP name : FEUP





DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 920 Líquido

Faixa : 0.30 μm - 400.00 μm / 30 Classes

Ref da amostra : CDWF 13h
Type produit : Residuo de cimento
Client : TI 06/15
Comentários :
Líquido :
Agente dispersante :
Operador : Gil
Empresa : LEMC
Localização :
Data : 11-02-2015 Hora : 17:42:50
Índice med. : 817 (804)
Database name : Granulog

Ultrasom : 60 s
Obscuration : 14 %
Diâmetro a 10% : 1.18 μm
Diâmetro a 50% : 7.58 μm
Diâmetro a 90% : 28.95 μm
Diâmetro médio : 11.55 μm
Fraunhofer :
Densidade/Fator : -----
Superfície específica : -----
Diluição automática : Não / Não
Medida./Limp. : 60s/60s/4
SOP name : FEUP

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.30	0.50	0.70	1.00	1.40	2.00	2.60	3.20	4.00	5.00
Q3	1.74	4.16	5.92	8.40	11.63	17.98	23.39	27.97	33.09	38.43
q3	0.52	1.14	1.26	1.67	2.31	4.29	4.97	5.31	5.53	5.76

x	6.00	8.00	10.00	12.00	15.00	20.00	25.00	32.00	36.00	45.00
Q3	43.13	51.58	58.98	64.94	71.54	79.08	85.48	93.08	96.02	99.25
q3	6.21	7.08	7.99	7.87	7.12	6.31	6.91	7.42	6.01	3.49

x	56.00	63.00	90.00	112.0	140.0	180.0	224.0	280.0	315.0	400.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / μm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution



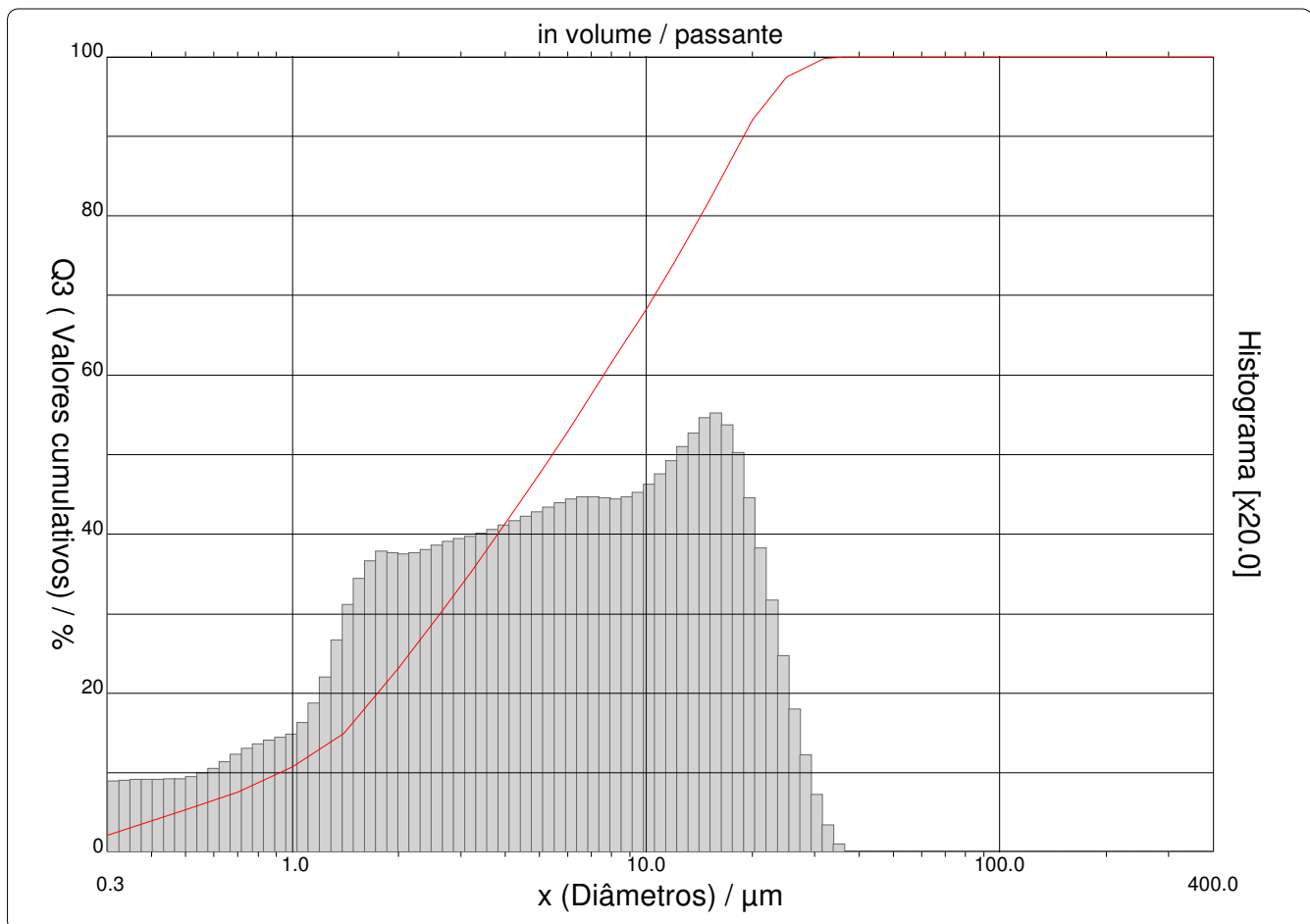
DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 920 Líquido

Faixa : 0.30 μm - 400.00 μm / 30 Classes

Ref da amostra : CDWF 24h
Type produit : Residuo de cimento
Client : TI 06/15
Comentários :
Líquido : Água/Etanol 96
Agente dispersante :
Operador : Gil
Empresa : LEMC
Localização :
Data : 24-02-2015 Hora : 15:05:51
Índice med. : 815 (807)
Database name : Granulog

Ultrasom : 60 s
Obscuration : 12 %
Diâmetro a 10% : 0.92 μm
Diâmetro a 50% : 5.43 μm
Diâmetro a 90% : 18.87 μm
Diâmetro médio : 7.99 μm
Fraunhofer
Densidade/Fator : -----
Superfície específica : -----
Diluição automática : Não / Não
Medida./Limp. : 60s/60s/4
SOP name : FEUP





DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 920 Líquido

Faixa : 0.30 μm - 400.00 μm / 30 Classes

Ref da amostra : CDWF 24h
Type produit : Residuo de cimento
Client : TI 06/15
Comentários :
Líquido : Água/Etanol 96
Agente dispersante :
Operador : Gil
Empresa : LEMC
Localização :
Data : 24-02-2015 Hora : 15:05:51
Índice med. : 815 (807)
Database name : Granulog

Ultrassom : 60 s
Obscuration : 12 %
Diâmetro a 10% : 0.92 μm
Diâmetro a 50% : 5.43 μm
Diâmetro a 90% : 18.87 μm
Diâmetro médio : 7.99 μm
Fraunhofer
Densidade/Fator : -----
Superfície específica : -----
Diluição automática : Não / Não
Medida./Limp. : 60s/60s/4
SOP name : FEUP

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.30	0.50	0.70	1.00	1.40	2.00	2.60	3.20	4.00	5.00
Q3	2.23	5.32	7.58	10.78	14.92	23.19	29.85	35.31	41.34	47.61
q3	0.70	1.54	1.71	2.28	3.13	5.89	6.45	6.68	6.87	7.14

x	6.00	8.00	10.00	12.00	15.00	20.00	25.00	32.00	36.00	45.00
Q3	52.93	61.57	68.29	74.06	81.81	92.07	97.40	99.77	100.00	100.00
q3	7.41	7.63	7.65	8.04	8.82	9.06	6.07	2.44	0.50	0.00

x	56.00	63.00	90.00	112.0	140.0	180.0	224.0	280.0	315.0	400.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / μm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution



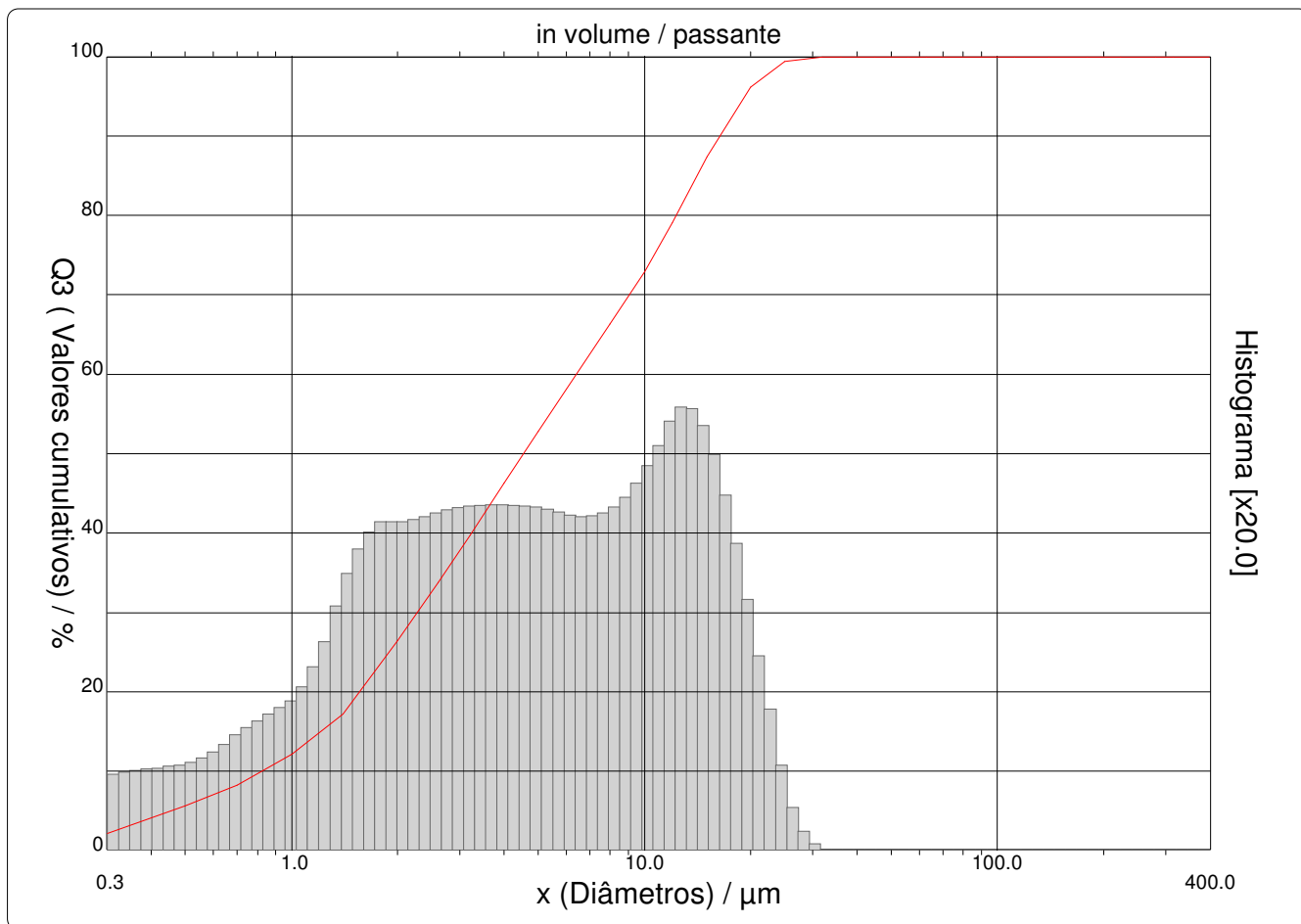
DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 920 Líquido

Faixa : 0.30 μm - 400.00 μm / 30 Classes

Ref da amostra : CDWF 48h
Type produit : Residuo de cimento
Client : TI 06/15
Comentários :
Líquido :
Agente dispersante :
Operador : Gil
Empresa : LEMC
Localização :
Data : 26-02-2015 Hora : 10:06:44
Índice med. : 814 (808)
Database name : Granulog

Ultrasom : 60 s
Obscuration : 18 %
Diâmetro a 10% : 0.82 μm
Diâmetro a 50% : 4.54 μm
Diâmetro a 90% : 16.34 μm
Diâmetro médio : 6.85 μm
Fraunhofer :
Densidade/Fator : -----
Superfície específica : -----
Diluição automática : Não / Não
Medida./Limp. : 60s/60s/4
SOP name : FEUP





DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 920 Líquido

Faixa : 0.30 μm - 400.00 μm / 30 Classes

Ref da amostra : CDWF 48h
Type produit : Residuo de cimento
Client : TI 06/15
Comentários :
Líquido :
Agente dispersante :
Operador : Gil
Empresa : LEMC
Localização :
Data : 26-02-2015 Hora : 10:06:44
Índice med. : 814 (808)
Database name : Granulog

Ultrasom : 60 s
Obscuration : 18 %
Diâmetro a 10% : 0.82 μm
Diâmetro a 50% : 4.54 μm
Diâmetro a 90% : 16.34 μm
Diâmetro médio : 6.85 μm
Fraunhofer :
Densidade/Fator : -----
Superfície específica : -----
Diluição automática : Não / Não
Medida./Limp. : 60s/60s/4
SOP name : FEUP

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.30	0.50	0.70	1.00	1.40	2.00	2.60	3.20	4.00	5.00
Q3	2.23	5.64	8.29	12.14	17.24	26.39	33.75	39.75	46.29	52.83
q3	0.70	1.71	2.02	2.77	3.89	6.58	7.19	7.41	7.51	7.51

x	6.00	8.00	10.00	12.00	15.00	20.00	25.00	32.00	36.00	45.00
Q3	58.12	66.31	72.96	79.08	87.41	96.11	99.38	100.00	100.00	100.00
q3	7.44	7.30	7.64	8.61	9.57	7.75	3.76	0.64	0.00	0.00

x	56.00	63.00	90.00	112.0	140.0	180.0	224.0	280.0	315.0	400.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / μm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution



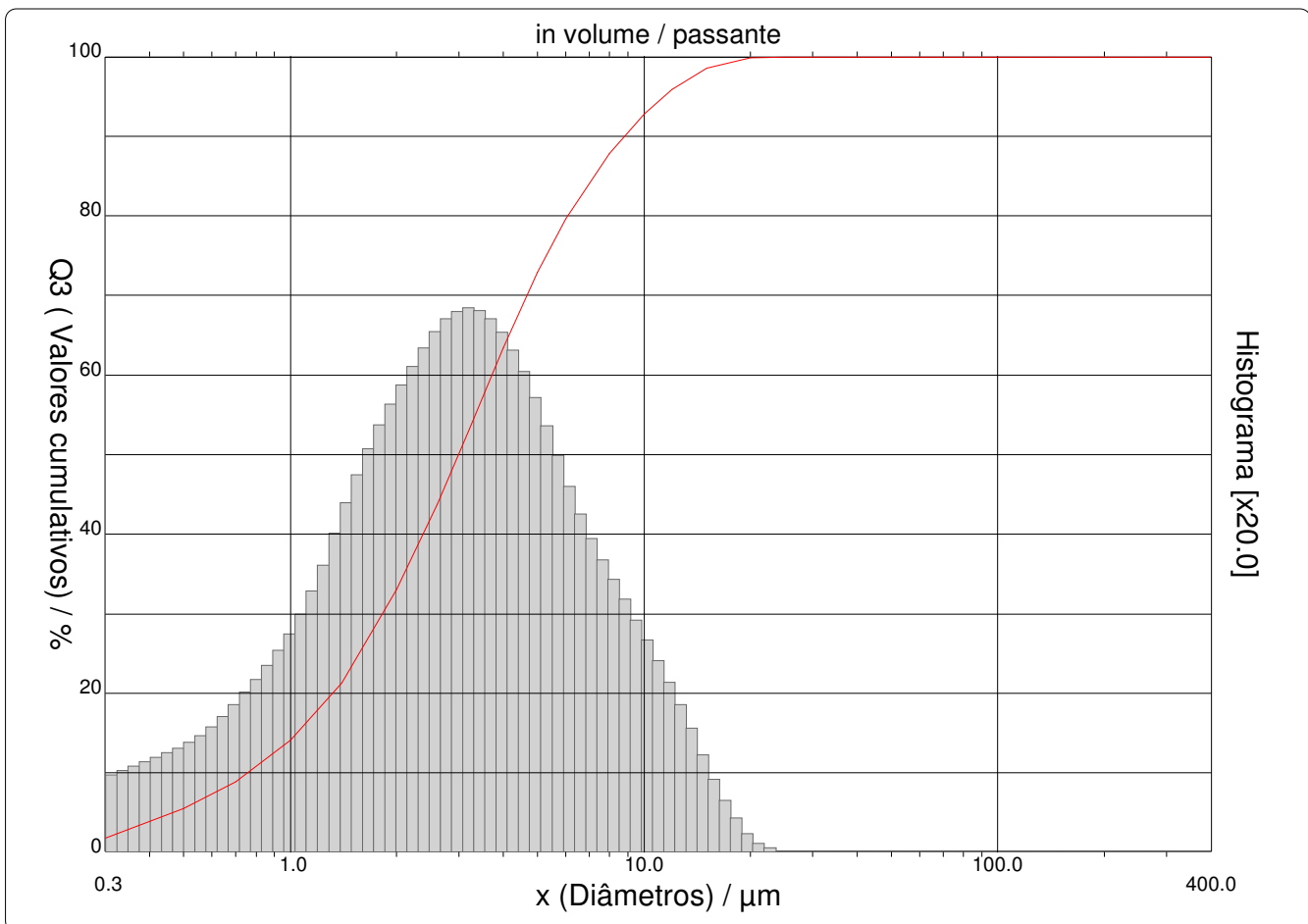
DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 920 Líquido

Faixa : 0.30 μm - 400.00 μm / 30 Classes

Ref da amostra : Filer
Type produit : Filer
Client : TI 06/15
Comentários :
Líquido : Água/Etanol 96
Agente dispersante :
Operador : Gil
Empresa : LEMC
Localização :
Data : 15-04-2015 Hora : 10:01:43
Índice med. : 812
Database name : Granulog

Ultrassom : 60 s
Obscuration : 19 %
Diâmetro a 10% : 0.75 μm
Diâmetro a 50% : 2.98 μm
Diâmetro a 90% : 8.82 μm
Diâmetro médio : 4.04 μm
Fraunhofer
Densidade/Fator : -----
Superfície específica : -----
Diluição automática : Não / Não
Medida./Limp. : 60s/60s/4
SOP name : FEUP





DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 920 Líquido

Faixa : 0.30 μm - 400.00 μm / 30 Classes

Ref da amostra : Filer
Type produit : Filer
Client : TI 06/15
Comentários :
Líquido : Água/Etanol 96
Agente dispersante :
Operador : Gil
Empresa : LEMC
Localização :
Data : 15-04-2015 Hora : 10:01:43
Índice med. : 812
Database name : Granulog

Ultrassom : 60 s
Obscuration : 19 %
Diâmetro a 10% : 0.75 μm
Diâmetro a 50% : 2.98 μm
Diâmetro a 90% : 8.82 μm
Diâmetro médio : 4.04 μm
Fraunhofer
Densidade/Fator : -----
Superfície específica : -----
Diluição automática : Não / Não
Medida./Limp. : 60s/60s/4
SOP name : FEUP

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.30	0.50	0.70	1.00	1.40	2.00	2.60	3.20	4.00	5.00
Q3	1.86	5.57	8.92	14.07	21.32	33.04	43.76	53.16	63.42	72.92
q3	1.18	1.88	2.57	3.74	5.57	8.49	10.56	11.70	11.89	11.01

x	6.00	8.00	10.00	12.00	15.00	20.00	25.00	32.00	36.00	45.00
Q3	79.60	87.84	92.75	95.87	98.52	99.88	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	9.47	7.40	5.69	4.42	3.06	1.22	0.14	0.00	0.00	0.00

x	56.00	63.00	90.00	112.0	140.0	180.0	224.0	280.0	315.0	400.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / μm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution

Anexo 7- Trabalhabilidades das argamassas realizadas

CLORETOS

	CTL	CDWf5	CDWf10
	232	232	233
1º Diâmetro (mm)	231	235	237
	231	240	235
	230	234	233
	237	229	237
2º Diâmetro (mm)	230	229	240
	235	228	237
	234	230	236
Média (mm)	233	232	236
Desvio padrão	2,56	4,05	2,33

CAPILARIDADE

	CTL	CDWf5	CDWf10
	229	237	239
1º Diâmetro (mm)	232	238	243
	231	240	234
	232	237	236
	238	237	238
2º Diâmetro (mm)	237	240	238
	234	238	242
	238	236	242
Média	234	238	239
Desvio padrão	3,44	1,46	3,16

CARBONATAÇÃO

	CTL	CDWf5	CDWf10
	235	238	233
Diâmetro (mm)	234	234	235
	236	232	237
	236	233	238
Média	235	234	236
Desviopadrão	0,96	2,63	2,22

ASR

	CTL	CDWf5	CDWf10
	230	235	230
Diâmetro (mm)	230	235	227
	231	236	230
	229	236	226
Média	230	235,5	228,25
Desviopadrão	0,82	0,58	2,06

RESISTÊNCIA AOS 7 DIAS

	CTL	CDWf5	CDWf10
	235	235	236
Diâmetro (mm)	236	234	236
	234	235	237
	235	236	238
Média	235	235	237
Desviopadrão	0,82	0,82	0,96

RESISTÊNCIA AOS 28 DIAS

	CTL	CDWf5	CDWf10
Diâmetro (mm)	230	235	235
	232	237	238
	229	235	237
	232	235	235
Média	231	236	236
Desvio padrão	1,50	1,00	1,50

RESISTÊNCIA AOS 90 DIAS

	CTL	CDWf5	CDWf10
Diâmetro (mm)	235	238	238
	236	235	240
	235	236	236
	236	233	237
Média	236	236	238
Desvio padrão	0,58	2,08	1,71

RESISTÊNCIA AOS 180 DIAS

	CTL	CDWf5	CDWf10
Diâmetro (mm)	235	234	231
	235	234	232
	235	237	235
	235	238	234
Média	235	236	233
Desvio padrão	0,00	2,06	1,83

Anexo 8- Resistências mecânicas

RESISTÊNCIA AOS 7 DIAS

Referência	Massa (g)	Resistência à flexão (Mpa)	Média (Mpa)	Desvio padrão (Mpa)	Coefficiente de variação (%)
CTL-1	591,9	6,3	6,0	0,4	6,0
CTL-2	592,1	6,1			
CTL-3	590,6	5,6			
CDWf5- 1	580,8	4,9	4,9	0,4	7,2
CDWf5- 2	576,8	5,2			
CDWf5- 3	577,1	4,5			
CDWf10- 1	568,8	5,2	5,1	0,2	3,4
CDWf10- 2	571,9	4,9			
CDWf10-3	569,1	5,2			

Referência	Massa (g)	Resistência à compressão (Mpa)		Média (Mpa)	Desvio padrão (Mpa)	Coefficiente de variação (%)
CTL-1	592,1	36,3	34,7	35,5	1,0	2,7
CTL-2	590,6	34,7	36,6			
CTL-3	580,8	28,7	29,6			
CDWf5- 1	576,8	29,8	27,9	28,5	1,2	4,1
CDWf5- 2	577,1	26,6	28,6			
CDWf5- 3	568,8	26,9	29,8			
CDWf10- 1	571,9	24,8	28,4	28,4	1,1	3,7
CDWf10- 2	569,1	28,1	28,8			
CDWf10-3	0,0	0,0	0,0			

RESISTÊNCIA AOS 28 DIAS

Referência	Massa (g)	Resistência à flexão (Mpa)	Média (Mpa)	Desvio padrão (Mpa)	Coefficiente de variação (%)
CTL-1	575,4	6,8	7,1	0,4	5,1
CTL-2	584,8	7,5			
CTL-3	583,6	7			
CDWf5- 1	572,7	6,8	6,7	0,1	1,7
CDWf5- 2	572,9	6,8			
CDWf5- 3	574,9	6,6			
CDWf10- 1	560,8	6,3	6,3	0,0	0,0
CDWf10- 2	560,2	6,3			
CDWf10-3	560,1	6,3			

Referência	Massa (g)	Resistência à compressão (Mpa)		Média (Mpa)	Desvio padrão (Mpa)	Coefficiente de variação (%)
CTL-1	575,4	46,9	44,6	46,3	0,9	2,0
CTL-2	584,8	47,3	46,7			
CTL-3	583,6	46,3	46,2			
CDWf5- 1	572,7	43,8	42,3	42,3	1,6	3,8
CDWf5- 2	572,9	42,7	39,2			
CDWf5- 3	574,9	42,9	42,8			
CDWf10- 1	560,8	39,5	39,2	38,1	1,3	3,4
CDWf10- 2	560,2	37,4	38,0			
CDWf10-3	560,1	38,3	35,9			

RESISTÊNCIAS 90 DIAS

Referência	Massa (g)	Resistência à flexão (Mpa)	Média (Mpa)	Desvio padrão (Mpa)	Coefficiente de variação (%)
CTL-1	592,7	8,2	7,8	0,4	4,6
CTL-2	593,3	7,7			
CTL-3	590,9	7,5			
CDWf5- 1	574,6	7,5	7,5	0,2	2,7
CDWf5- 2	572,1	7,7			
CDWf5- 3	571,1	7,3			
CDWf10- 1	572,6	7	7,2	0,2	2,4
CDWf10- 2	572,4	7,3			
CDWf10-3	568,0	7,3			

Referência	Massa (g)	Resistência à compressão (Mpa)		Média (Mpa)	Desvio padrão (Mpa)	Coefficiente de variação (%)
CTL-1	592,7	53,7	53,4	53,4	0,5	0,9
CTL-2	593,3	53,7	52,6			
CTL-3	590,9	53,2	54,0			
CDWf5- 1	574,6	51,6	51,6	51,3	0,8	1,5
CDWf5- 2	572,1	51,3	52,2			
CDWf5- 3	571,1	51,3	49,9			
CDWf10- 1	572,6	46,3	45,9	46,8	0,7	1,5
CDWf10- 2	572,4	47,5	46,3			
CDWf10-3	568,0	47,6	47,1			

Anexo 9 - Resistência à carbonatação

	Área não carbonatada (AUTOCAD)	Área real não carbonatada (cm ²)	Área real carbonatada (cm ²)	Área carbonatada Média (cm ²)	Desvio padrão
CTL-1	15474,1	7,2	8,8	8,7	0,3
CTL-2	15425,8	7,2	8,8		
CTL-3	16430,8	7,7	8,4		
CDWf5- 1	13603,4	6,3	9,7	9,3	0,3
CDWf5- 2	14773,0	6,9	9,1		
CDWf5- 3	14476,3	6,7	9,3		
CDWf10- 1	12574,4	5,9	10,1	10,6	0,4
CDWf10- 2	11214,7	5,2	10,8		
CDWf10-3	11323,4	5,3	10,7		

Anexo10 - Penetração acelerada por cloretos

	xd6	xd4	xd2	xd1	xd3	xd5	xd7
CTL - 1 i	18,50	21,63	19,52	19,50	20,31	21,10	20,08
CTL - 1 ii	21,16	20,55	21,58	19,86	20,41	19,41	19,16
CTL - 2 i	18,43	17,65	20,84	21,64	23,64	20,41	20,81
CTL - 2 ii	19,16	20,58	21,78	18,56	18,72	19,24	20,97
CTL - 3 i	22,42	22,44	20,06	17,21	19,87	18,41	15,45
CTL - 3 ii	9,82	19,42	21,31	21,71	22,39	21,45	22,48
CDWf5% - 1 i	15,70	28,90	20,15	19,60	18,50	18,30	19,05
CDWf5%- 1 ii	18,30	19,00	19,40	19,30	18,80	17,55	17,45
CDWf5% - 2 i	10,40	14,60	17,00	16,50	15,70	19,50	20,75
CDWf5% - 2 ii ⁽¹⁾	17,80	14,65	15,75	18,05	15,25	9,70	16,01
CDWf5%- 3 i	17,70	21,80	19,30	17,85	18,45	19,60	18,20
CDWf5% - 3 ii	19,00	20,40	19,40	18,70	19,20	20,00	18,20
CDWf10% - 1 i	20,48	21,81	21,25	12,25	12,20	7,06	18,91
CDWf10%- 1 ii	22,06	23,01	21,04	21,05	21,35	21,57	20,84
CDWf10% - 2 i	22,67	21,77	22,07	20,32	21,26	20,84	19,12
CDWf10% - 2 ii	20,27	20,08	19,36	17,67	19,49	20,87	22,24
CDWf10%- 3 i	20,12	21,26	22,01	19,86	19,24	19,43	18,98
CDWf10% - 3 ii	18,68	17,18	20,01	17,48	18,71	18,10	19,20

(1) ocorre uscorrência, logo não entra para o cálculo da média

Provete	U (V)	Tm (°C)	Leituras (mm)									
			xd6	xd4	xd2	xd1	xd3	xd5	xd7	Xdmed (mm)	Dns	Dns médio
CTL-1	25,15	23,64	19,83	19,94	20,65	20,33	21,45	20,31	20,02	20,36	14,18	13,94
CTL-2	25,15	23,64	18,80	19,12	21,31	20,10	21,18	19,83	20,89	20,17	14,04	
CTL-3	25,15	23,64	16,12	20,93	20,69	19,46	21,13	19,93	18,97	19,60	13,60	
CDWf5- 1	25,09	25,11	17,00	23,95	19,78	19,45	18,65	17,93	18,25	19,29	13,42	12,63
CDWf5- 2	25,09	24,27	10,40	14,60	17,00	16,50	15,70	19,50	20,75	16,35	11,17	
CDWf5- 3	25,09	25,04	18,35	21,10	19,35	18,28	18,83	19,80	18,20	19,13	13,30	
CDWf10- 1	24,52	25,13	21,27	22,41	21,15	16,65	16,78	14,32	19,88	18,92	13,15	13,66
CDWf10- 2	24,52	24,83	21,47	20,93	20,72	19,00	20,38	20,86	20,68	20,57	14,39	
CDWf10-3	24,52	24,98	19,40	19,22	21,01	18,67	18,98	18,77	19,09	19,30	13,43	

Anexo 11 - Absorção de água por capilaridade

Provete			CTL1		CTL2		CTL3	
Forma			cilindro (h=50mm, d=100mm)		cilindro (h=50mm, d=100mm)		cilindro (h=50mm, d=100mm)	
Área da base (mm ²)			7853,98		7853,98		7853,98	
Tempo	Tempo (min)	Raiz do tempo (min)	Massa (g)	Variação da massa	Massa (g)	Variação da massa	Massa (g)	Variação da massa
0 min	0	0,00	882,68		890,68		885,89	
5 min	5	2,24	884,74	0,262	892,24	0,199	888,19	0,293
10 min	10	3,16	885,50	0,359	892,94	0,288	889,04	0,401
20 min	20	4,47	886,46	0,481	893,77	0,393	890,08	0,533
30 min	30	5,48	887,11	0,564	894,37	0,470	890,83	0,629
1 h	60	7,75	888,22	0,705	895,39	0,600	892,03	0,782
1 h 30	90	9,49	889,04	0,810	896,04	0,682	892,90	0,893
2 h	120	10,95	889,47	0,865	896,50	0,741	893,33	0,947
2 h 30	150	12,25	889,95	0,926	896,87	0,788	893,76	1,002
3 h	180	13,42	890,31	0,971	897,25	0,837	894,11	1,047
3 h 30	210	14,49	890,64	1,013	897,52	0,871	894,39	1,082
4 h	240	15,49	890,95	1,053	897,83	0,910	894,67	1,118
4 h 30	270	16,43	891,22	1,087	898,04	0,937	894,87	1,143

Provete		CDWf5-1			CDWf5-2		CDWf5-3	
Forma		cilindro (h=50mm, d=100mm)			cilindro (h=50mm, d=100mm)		cilindro (h=50mm, d=100mm)	
Área da base (mm2)		7853,98			7853,98		7853,98	
Tempo	Tempo (min)	Raiz do tempo (min)	Massa (g)	Variação da massa	Massa (g)	Variação da massa	Massa (g)	Variação da massa
0 min	0	0,00	863,78		859,19		859,04	
5 min	5	2,24	864,86	0,138	860,40	0,154	860,13	0,139
10 min	10	3,16	865,29	0,192	860,81	0,206	860,54	0,191
20 min	20	4,47	866,00	0,283	861,51	0,295	861,27	0,284
30 min	30	5,48	866,65	0,365	862,13	0,374	861,97	0,373
1 h	60	7,75	868,55	0,607	863,83	0,591	864,01	0,633
1 h 30	90	9,49	870,26	0,825	865,47	0,800	865,88	0,871
2 h	120	10,95	871,98	1,044	867,09	1,006	867,71	1,104
2 h 30	150	12,25	873,36	1,220	868,51	1,187	869,29	1,305
3 h	180	13,42	874,89	1,415	869,93	1,367	870,79	1,496
3 h 30	210	14,49	876,27	1,590	871,26	1,537	872,26	1,683
4 h	240	15,49	877,64	1,765	872,58	1,705	873,66	1,861
4 h 30	270	16,43	878,86	1,920	873,75	1,854	874,96	2,027

Provete		CDWf10-1			CDWf10-2		CDWf10-3	
Forma		cilindro (h=50mm, d=100mm)			cilindro (h=50mm, d=100mm)		cilindro (h=50mm, d=100mm)	
Área da base (mm2)		7853,98			7853,98		7853,98	
Tempo	Tempo (min)	Raiz do tempo (min)	Massa (g)	Variação da massa	Massa (g)	Variação da massa	Massa (g)	Variação da massa
0 min	0	0,00	846,38		852,32		844,12	
5 min	5	2,24	847,60	0,155	853,69	0,174	845,48	0,173
10 min	10	3,16	847,98	0,204	854,16	0,234	845,96	0,234
20 min	20	4,47	848,65	0,289	854,98	0,339	846,74	0,334
30 min	30	5,48	849,23	0,363	855,68	0,428	847,46	0,425
1 h	60	7,75	850,89	0,574	857,75	0,691	849,51	0,686
1 h 30	90	9,49	852,39	0,765	859,55	0,921	851,36	0,922
2 h	120	10,95	853,80	0,945	861,37	1,152	853,14	1,148
2 h 30	150	12,25	855,02	1,100	862,94	1,352	854,70	1,347
3 h	180	13,42	856,18	1,248	864,48	1,548	856,25	1,544
3 h 30	210	14,49	857,28	1,388	865,95	1,735	857,73	1,733
4 h	240	15,49	858,39	1,529	867,43	1,924	859,17	1,916
4 h 30	270	16,43	859,39	1,656	868,78	2,096	859,51	1,960

Anexo 12 - Reacção álcalis-silica com CDW

ASR DA ARGAMASSA DE CTL

Idade do provete	Provete A				Provete B				Expansão média
	Li	Lx	Diferença com a leitura 0	Expansão	Lx	L	Diferença com a leitura 0	Expansão	
2	-3,203	-3,21125	0,00	0,00	-1,342	-1,34875	0,00	0,00	0,00
	-3,209				-1,346				
	-3,215				-1,349				
	-3,218				-1,358				
4	-3,228	-3,23775	-0,03	-0,01	-1,357	-1,35625	-0,01	0,00	-0,01
	-3,239				-1,351				
	-3,239				-1,354				
	-3,245				-1,363				
8	-3,147	-3,15975	0,05	0,02	-1,264	-1,27125	0,08	0,03	0,03
	-3,159				-1,271				
	-3,164				-1,276				
	-3,169				-1,274				
11	-3,111	-3,12075	0,09	0,04	-1,223	-1,20625	0,14	0,06	0,05
	-3,121				-1,233				
	-3,123				-1,138				

	-3,128				-1,231				
16	-2,994	-3,002	0,21	0,08	-1,124	-1,13775	0,21	0,08	0,08
	-2,999				-1,137				
	-3,004				-1,14				
	-3,011				-1,15				
21	-2,898	-2,9075	0,30	0,12	-1,034	-1,04875	0,30	0,12	0,12
	-2,906				-1,048				
	-2,909				-1,052				
	-2,917				-1,061				
28	-2,747	-2,7565	0,45	0,18	-0,884	-0,89	0,46	0,18	0,18
	-2,754				-0,89				
	-2,759				-0,881				
	-2,766				-0,905				

ASR DA ARGAMASSA DE CDWf5

Idade do provete	Provete A				Provete B				Expansão média
	Li	Lx	Diferença com a leitura 0	Expansão	Lx	L	Diferença com a leitura 0	Expansão	
2	-4,817	-4,83	0,00	0,00	-3,644	-3,65425	0,00	0,00	0,00
	-4,819				-3,656				
	-4,838				-3,658				
	-4,846				-3,659				
4	-4,826	- 4,82975	0,00	0,00	-3,645	-3,65375	0,00	0,00	0,00
	-4,816				-3,656				
	-4,834				-3,658				
	-4,843				-3,656				
8	-4,769	- 4,77225	0,06	0,02	-3,571	-3,5785	0,08	0,03	0,03
	-4,765				-3,579				
	-4,778				-3,58				
	-4,777				-3,584				
11	-4,749	- 4,74875	0,08	0,03	-3,553	-3,56	0,09	0,04	0,04
	-4,741				-3,56				
	-4,75				-3,562				
	-4,755				-3,565				
16	-4,64	-	0,18	0,07	-3,445	-3,4585	0,20	0,08	0,08

	-4,644	4,64975			-3,461				
	-4,657				-3,462				
	-4,658				-3,466				
21	-4,58	-4,589	0,24	0,10	-3,376	-3,3875	0,27	0,11	0,10
	-4,586				-3,388				
	-4,592				-3,39				
	-4,598				-3,396				
28	-4,449	-4,4525	0,38	0,15	-3,239	-3,249	0,41	0,16	0,16
	-4,439				-3,244				
	-4,459				-3,254				
	-4,463				-3,259				

ASR DA ARGAMASSA DE CDWF10

Idade do provete	Provete A				Provete B				Expansão média
	Li	Lx	Diferença com a leitura 0	Expansão	Lx	L	Diferença com a leitura 0	Expansão	
2	-3,549	-3,5475	0,00	0,00	-5,493	-5,49425	0,00	0,00	0,00
	-3,561				-5,489				
	-3,54				-5,497				
	-3,54				-5,498				
4	-3,563	-3,568	-0,02	-0,01	-5,495	-5,4985	0,00	0,00	-0,01
	-3,571				-5,494				
	-3,577				-5,506				
	-3,561				-5,499				
8	-3,489	-3,4965	0,05	0,02	-5,54	-5,47	0,02	0,01	0,02
	-3,504				-5,44				
	-3,492				-5,448				
	-3,501				-5,452				
11	-3,471	-3,4785	0,07	0,03	-5,406	-5,4175	0,08	0,03	0,03
	-3,484				-5,418				
	-3,477				-5,422				
	-3,482				-5,424				
16	-3,35	-3,3945	0,15	0,06	-5,319	-5,328	0,17	0,07	0,06

	-3,408				-5,329				
	-3,41				-5,334				
	-3,41				-5,33				
21	-3,327	-3,3365	0,21	0,08	-5,259	-5,2655	0,23	0,09	0,09
	-3,337				-5,261				
	-3,341				-5,269				
	-3,341				-5,273				
28	-3,239	-3,2505	0,30	0,12	-5,154	-5,16125	0,33	0,13	0,13
	-3,252				-5,159				
	-3,257				-5,162				
	-3,254				-5,170				

Anexo 13 - Reacção álcalis-sílica com fíler

ASR DA ARGAMASSA DE CTL

Idade do provete	Provete A				Provete B				Expansão média
	Li	Lx	Diferença com a leitura 0	Expansão	Li	Lx	Diferença com a leitura 0	Expansão	
2	5,69	5,68325	0,00	0,00	5,685	5,67575	0,00	0,00	0,00
	5,686				5,676				
	5,681				5,676				
	5,676				5,666				
3	5,699	5,6915	0,01	0,00	5,681	5,6725	0,00	0,00	0,00
	5,7				5,672				
	5,682				5,672				
	5,685				5,665				
6	5,716	5,71375	0,03	0,01	5,732	5,7235	0,05	0,02	0,02
	5,719				5,724				
	5,712				5,723				
	5,708				5,715				
8	5,778	5,768	0,08	0,03	5,786	5,7625	0,09	0,03	0,03
	5,772				5,763				
	5,763				5,756				

	5,759				5,745				
13	5,912	5,9065	0,22	0,09	5,904	5,8905	0,21	0,09	0,09
	5,912				5,891				
	5,902				5,888				
	5,9				5,879				
16	5,963	5,96	0,28	0,11	5,956	5,94675	0,27	0,11	0,11
	5,965				5,948				
	5,958				5,947				
	5,954				5,936				
21	6,07	6,06675	0,38	0,15	6,055	6,049	0,37	0,15	0,15
	6,073				6,048				
	6,064				6,049				
	6,06				6,044				
28	6,213	6,20975	0,53	0,21	6,19	6,1855	0,51	0,20	0,21
	6,213				6,188				
	6,208				6,185				
	6,205				6,179				

ASR DA ARGAMASSA DE CDWf5

Idade do provete	Provete A				Provete B				Expansão média
	Li	Lx	Diferença com a leitura 0	Expansão	Li	Lx	Diferença com a leitura 0	Expansão	
2	5,81	5,8025	0,00	0,00	4,65	4,6375	0,00	0,00	0,00
	5,802				4,64				
	5,798				4,633				
	5,8				4,627				
3	5,756	5,75	-0,05	-0,02	4,62	4,6135	-0,02	-0,01	-0,02
	5,748				4,615				
	5,748				4,61				
	5,748				4,609				
6	5,825	5,815	0,01	0,01	4,69	4,68175	0,04	0,02	0,01
	5,815				4,685				
	5,81				4,678				
	5,81				4,674				
8	5,885	5,875	0,07	0,03	4,742	4,731	0,09	0,04	0,03
	5,875				4,74				
	5,87				4,723				
	5,87				4,719				
13	6,008	6,00225	0,20	0,08	4,867	4,85325	0,22	0,09	0,08
	6,004				4,858				
	5,999				4,846				
	5,998				4,842				
16	6,055	6,05325	0,25	0,10	4,912	4,90575	0,27	0,11	0,10
	6,057				4,911				
	6,05				4,901				

	6,051				4,899				
21	6,155	6,1535	0,35	0,14	5,005	5,00025	0,36	0,15	0,14
	6,158				5,014				
	6,15				4,993				
	6,151				4,989				
28	6,308	6,299	0,50	0,20	5,155	5,14825	0,51	0,20	0,20
	6,3				5,153				
	6,294				5,144				
	6,294				5,141				

ASR DA ARGAMASSA DE CDWF10

Idade do provete	Provete A				Provete B				Expansão média
	Li	Lx	Diferença com a leitura 0	Expansão	Li	Lx	Diferença com a leitura 0	Expansão	
2	4,972	4,97	0,00	0,00	5,209	5,199	0,00	0,00	0,00
	4,966				5,2				
	4,964				5,198				
	4,978				5,189				
3	4,955	4,957	-0,01	-0,01	5,185	5,185	-0,01	-0,01	-0,01
	4,954				5,188				
	4,953				5,191				
	4,966				5,176				
6	5,022	5,00875	0,04	0,02	5,247	5,2415	0,04	0,02	0,02
	5,002				5,241				
	5				5,245				
	5,011				5,233				
8	5,062	5,05675	0,09	0,03	5,283	5,2805	0,08	0,03	0,03
	5,068				5,285				
	5,051				5,28				
	5,046				5,274				
13	5,178	5,177	0,21	0,08	5,429	5,4255	0,23	0,09	0,09
	5,179				5,428				
	5,176				5,429				
	5,175				5,416				
16	5,269	5,2615	0,29	0,12	5,482	5,4795	0,28	0,11	0,11
	5,262				5,483				
	5,259				5,481				

	5,256				5,472				
21	5,38	5,37625	0,41	0,16	5,6	5,5925	0,39	0,16	0,16
	5,376				5,593				
	5,374				5,592				
	5,375				5,585				
28	5,549	5,547	0,58	0,23	5,753	5,75025	0,55	0,22	0,23
	5,546				5,748				
	5,545				5,755				
	5,548				5,745				